ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ \mathbb{N}_{2} ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Индекс журнала в «Объединенном каталоге «Пресса России»: 41891

ISSN 1729-6501 (Print)

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 – Томск;

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;

А.С. Багдасарян – д-р техн. наук – Москва;

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

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

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный

технический университет»

Адрес издателя: 394006, Воронеж, ул. 20-летия

Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

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"

The index of the magazine in the United Catalog "Russian Press": 41891

ISSN 1729-6501 (Print)

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.) – Tomsk;

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;

A.S. Bagdasaryan – Dr. Sc. (Tech.) – Woronezh,

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

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

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)

СМОЛЕНЦЕВ ВЛАДИСЛАВ ПАВЛОВИЧ



ПОЗДРАВЛЯЕМ!5 августа 2021 года исполнилось **85 лет** одному из выдающихся сотрудников

Воронежского государственного технического университета, доктору технических наук, профессору кафедры технологии машиностроения, академику Российской Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского и международной Академии информатизации, члену-корреспонденту Академии технологических наук РФ, научному советнику РИА, члену комиссии по машиностроению Польской Академии наук, академику АН США, члену Европейского экологического общества,

Смоленцеву Владиславу Павловичу!

Смоленцев Владислав Павлович, родился 5 августа 1936 года. В 1960 году закончил Казанский авиационный институт по специальности «Авиационные двигатели». С 1959 по 1979 год работал В Казанском филиале научноисследовательского института авиационной техники Казанском химикотехнологическом институте им. С.М. Кирова в должностях инженера, заместителя начальника института по науке, профессора, заведующего кафедрой. С 1979 г. по настоящее время работает в Воронежском государственном техническом университете, где много лет заведовал новой кафедрой. По совместительству являлся научным руководителем Воронежского механического завода и других промышленных предприятий.

Владислав Павлович Смоленцев – заслуженный изобретатель РСФСР, заслуженный работник высшей школы РФ, заслуженный испытатель

космической техники РФ, заслуженный создатель космической техники РФ. Почетный профессор Орловского и Брянского государственных технических университетов. Член ряда научных академий РФ, академии наук США; международного экологического общества (Польша), Польской академии наук.

Область научных интересов: технологические методы повышения качества и надежности изделий авиационно-космической отрасли машиностроения.

В этом направлении имеется более 1000 научных работ, в том числе 22 монографии, 11 учебников по обеспечению качества изделий. Он соавтор 4 справочников, 3 энциклопедий, более 200 изобретений.

Являлся и является председателем и членом диссертационных советов в Воронеже (объединенного совета Д 999.155.03 с ведущими учеными из 6 университетов), Ленинграде, Казани. Под его руководством защищено 24 докторских и 67 кандидатских диссертаций.

Работы В.П. Смоленцева отмечены правительственными наградами (медалями, благодарностью Президента РФ и др.), государственными и отраслевыми почетными званиями (Заслуженный изобретатель РСФСР,1982 г.; Заслуженный работник высшей школы РФ, 1998 г.; Заслуженный испытатель космической техники, 2000 г.; Заслуженный создатель космической техники. 2002 г.; Ветеран космической техники, 2003 г.), премией Правительства РФ (2000 г.), почетными грамотами Министерств, ЦК ВЦСПС, ВОИР, ЦП НТО. Награжден 2 золотыми, 2 серебряными, бронзовой медалями ВДНХ СССР, дипломом I степени ВДНХ СССР; медалями им. К.Э. Циол-Королева, Ю.А. Гагарина, ковского, С.П. М.В. Келдыша, Г.С. Титова, А.Д. Надирадзе, "60 лет СССР", "За доблестный труд" (1970 г.), "Ветеран труда" (1990 г.); знаками "За освоение целинных земель" (1955 г.), "Отличник изобретательства", "Ударник пятилетки" (1975, 1980, 1985 гг.), "Победитель социалистического соревнования" (1973, 1975, 1980, 1985); многочисленными благодарностями и грамотами университета.

Владислав Павлович Смоленцев – создатель и руководитель научной школы "Электрические методы обработки в авиакосмической отрасли", включающей нанотехнологические методы формообразования при электрохимической размерной обработке и прототипирование поверхностей.

Для всех сотрудников, студентов и аспирантов кафедры Владислав Павлович является доброжелательным наставником, коллегой и товарищем, отличающимся чуткостью и отзывчивостью ко всем окружающим.

Редакция журнала и коллеги сердечно поздравляют Владислава Павловича с юбилеем и желают ему здоровья, благополучия и успехов в научной деятельности!

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Моделирование расчетных компонентов систем питания персональных ЭВМ А.Н. Юров, Д.В. Цымбал
Организация взаимодействия с виртуальной реальностью на основе беговой платформы для комплексного обучения специалистов А.Д. Обухов, Д.Л. Дедов, В.В. Вострикова, Д.В. Теселкин, Е.О. Суркова
Случайное мультимодальное глубокое обучение в задаче распознавания изображений А.И. Паршин, М.Н. Аралов, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова
Метод комплексного анализа данных при диагностике сложного энергетического оборудовани Е.А. Абидова, А.Д. Данилов, А.Е. Дембицкий, А.В. Чернов
Повышение информативности совмещенных разнодиапазонных изображений в медицинской диагностике А.Н. Ветров, А.Ю. Потлов
Решение задачи определения местоположения беспилотного летательного аппарата в режиме счисления координат с помощью системы технического зрения Д.А. Смирнов, В.Г. Бондарев, А.В. Тепловодский, А.В. Николенко
Особенности организации доступа в автоматизированных информационных системах на основе принципов нелинейной динамики Ю.С. Шевнина, Л.Г. Гагарина, А.В. Чирков, Н.С. Миронов
Применение математических моделей и алгоритмов при планировании и прогнозировании потребления водных ресурсов В.В. Мокшин, А.В. Спиридонова, Г.В. Спиридонов
Радиотехника и связь
Анализатор сигналов ZigBee И.С. Фаустов, В.Б. Манелис, А.Б. Токарев, В.А. Козьмин, В.А. Сладких
Полуволновой диполь с активным рефлектором на основе оптоуправляемого метаматериала Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров
Результаты математического моделирования надежности проектируемых станций спутниковой связи на подвижных объектах Д.Г. Пантенков, В.П. Литвиненко
Математическая модель корреляционного приемника с кусочно-линейной аппроксимацией решающей функции порогового устройства М.Ф. Волобуев, В.С. Костенников, А.О. Шмойлов
Разработка МІМО антенной решетки для сетей 5G К.А. Бердников, Е.А. Ищенко, В.В. Кузнецова, С.М. Фёдоров
Методы оценки канала связи с пространственной модуляцией на основе корреляции О.Н. Чирков
Алгоритмы формирования узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов вне коль- ца импульсно-фазовой автоматической подстройки частоты синтезатора частот С.С. Печников, С.А. Шерстюков

Учёт диаграммы направленности бортовой антенны при анализе канала связи с летательным аппаратом	
С.В. Кузьмин, К.О. Коровин, А.В. Андропов	118
Гибридное моделирование для электродинамического анализа крупногабаритных объектов С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, К.А. Бердников, Б.А. Шиянов, А.А. Козлова	123
Машиностроение и машиноведение	
Исследование энергоэффективности двухкамерных импульсных устройств для штамповки А.Ю. Боташев, А.А. Мусаев	128
Особенности проектирования твердосплавных сборных рабочих элементов деформирующих протяжек Я.Б. Немировский, И.В. Шепеленко, С.Е. Шейкин, Ю.А. Цеханов, Ф.Й. Златопольский, О.И. Попова, М.И. Попова.	134
Влияние технологических факторов на эффективность удаления окалины с листового проката для полых шариков	143
Расчет нестандартного однорогого грузового крюка грузоподъемного крана В.И. Сероштан, П.В. Витчук, В.Ю. Анцев, Н.А. Витчук	148
Исследование процесса нагрева трубной заготовки при газовой штамповке А.Ю. Боташев, Р.А. Байрамуков, Н.У. Бисилов, Р.С. Малсугенов	156

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Simulation of design components of power supply systems for personal computers A.N. Yurov, D.V. Tsymbal	8
Organization of interaction with virtual reality based on a running platform for comprehensive training of specialists A.D. Obukhov, D.L. Dedov, V.V. Vostrikova, D.V. Teselkin, E.O. Surkova	14
Random multi-modal deep learning in the problem of image recognition A.I. Parshin, M.N. Aralov, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova	21
Method of comprehensive data analysis in diagnostics of complex power equipment E.A. Abidova, A.D. Danilov, A.E. Dembitskiy, A.V. Chernov	27
Improvement of informativity of combined different-range images in medical diagnostics A.N. Vetrov, A.Yu. Potlov	36
Solving the problem of determining the location of an unmanned aerial vehicle in the coordinate counting mode using a technical vision system D.A. Smirnov, V.G. Bondarev, A.V. Teplovodskiy, A.V. Nikolenko	43
Features of organization of access in automated information systems based on the principles of non-linear dynamics Yu.S. Shevnina, L.G. Gagarina, A.V. Chirkov, N.S. Mironov	50
Application of mathematical models and algorythms for the water sources consumption planning and forecasting V.V. Mokshin, A.V. Spiridonova, G.V. Spiridonov	57
Radio engineering and communication	
ZigBee signals analyzer I.S. Faustov, V.B. Manelis, A.B. Tokarev, V.A. Koz'min, V.A. Sladkikh	65
Half-wave dipole with an active reflector based on opto-controlled metamaterial E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, S.M. Fyedorov	71
Results of mathematical simulation of reliability of projected satellite communication stations on mobile objects D.G. Pantenkov, V.P. Litvinenko	81
Mathematical model of a correlation receiver with a piecewise linear approximation of the decision function of the threshold device M.F. Volobuev, V.S. Kostennikov, A.O. Shmoylov	92
Designing a MIMO antenna array for 5G networks K.A. Berdnikov, E.A. Ishchenko, V.V. Kuznetsova, S.M. Fyedorov	99
Estimation methods of a channel with spatial modulation based on correlation O.N. Chirkov	106
Algorithms for the formation of narrow-band spectral-efficient radio signals outside the ring of pulse- phase automatic frequency tuning of the frequency synthesizer S.S. Pechnikov, S.A. Sherstyukov.	111

Accounting the directional diagram of the on-board antenna in analysis of the communication channel with the aircraft S.V. Kuz'min, K.O. Korovin, A.V. Andropov	118
Hybrid modelung for electrodynamic analysis of large-sized objects S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, K.A. Berdnikov, B.A. Shiyanov, A.A. Kozlova	123
Mechanical engineering and science of machines	
Research of energy efficiency of two-chamber pulse devices for stamping A.Yu. Botashev, A.A. Musaev	128
Design features of carbide assembly working elements of deforming broaches Ya.B. Nemirovskiy, I.V. Shepelenko, S.E. Sheykin, Yu.A. Tsekhanov, F.Y. Zlatopolskiy, O.I. Popova, M.I. Popova.	134
Influence of technological factors on the efficiency of removal of scale from flats for hollow balls A.V. Panfilova, A.V. Korolev, O.P. Reshetnikova, B.M. Iznairov, A.N. Vasin	143
Calculation of non-standard single cargo hook V.I. Seroshtan, P.V. Vitchuk, V.Yu. Antsev, N.A. Vitchuk	148
Studying the process of heating of a pipe billet during gas forming A.Yu. Botashev, R.A. Bayramukov, N.U. Bisilov, R.S. Malsugenov	156

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.001 УДК 004.415

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ЭВМ

А.Н. Юров, Д.В. Цымбал

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: предложена разработка цифрового макета изделия, который представляет собой компонент ЭВМ – импульсный блок питания. Производится анализ предполагаемых компонентов персонального компьютера, которые будут установлены в систему. При необходимости есть возможность выбора с добавлением новых компонентов в системный блок ЭВМ. После определения заданных компонентов ПК производится расчет мощности, которая нужна для получения стабильной работы системы в целом. По произведенным расчетам выполняется 3D-моделирование блока питания с разъемами для подключения материнской платы, видеокарты, а также прочих устройств, в том числе и накопителей информации. В работе исследованы вопросы по применению методов линейного программирования для решения поставленных задач в соответствии с исходными данными, а также подходы по получению 3D-модели источника питания с построенными трассами до разъемов подключения устройств и компонентов персонального компьютера. Кроме того, подготовлено программное обеспечение, в котором визуально представлен процесс построения сборочной модели БП согласно произведенным расчетам

Ключевые слова: модули проектирования, импортируемые 3D-модели, построение трасс, геометрическое ядро Open Cascade

Введение

На текущий момент наблюдается тенденция перевода сотрудников образования, ряда предприятий, сферы IT на удаленный режим работы, вызванный пандемией по всему миру. При этом требуется выполнение поставленных рабочих задач в срок с применением вычислительной техники. В ряде случаев технику (компоненты ЭВМ) приходиться выбирать и конфигурировать самостоятельно. Компоненты персонального компьютера должны соответствовать уровню решаемых задач с соответствующим программным обеспечением. Для стабильной работы элементов персонального компьютера требуется источники питания с достаточным запасом по мощности и количеству разъёмов для подключения запоминающих устройств. Получение имитационных моделей источников питания, их компоновка и расчеты нагрузки позволят сделать правильный выбор в приобретении данного компонента ЭВМ. В статье рассмотрены подходы и реализация программного средства, в котором, согласно используемой в вычислительной системе компонентной базе, создается имитационная модель источника питания для персональных ЭВМ.

Требования при разработке проектов для получения элементов копированием

Для реализации программного средства необходимо не только разработать расчетную методику по подбору источника питания, но и подготовить модель данных, обеспечивающую в программном продукте построение твердотельной сборочной модели.

Приложение должно в себя включать средства, обеспечивающие после расчетов вывод имитационной модели блока питания в 3D представлении. Учитывая габариты будущей сборочной модели, можно построить приложение таким образом, чтобы формировалось отдельное окно, где будет представлен результат с построенным блоком питания персонального компьютера.

Для приложения требуется подготовить инструментальную панель, на которой будет размещено несколько функциональных элементов — один для расчётов, второй для получения твердотельной модели. Причем второй элемент будет активен лишь в том случае, если подготовлена структура данных для построения блока питания. Структуру планируется заполнить по завершению расчета.

Сам процесс моделирования может занять некоторое время, поэтому в приложение необ-

© Юров А.Н., Цымбал Д.В., 2021

ходимо предусмотреть индикатор процесса моделирования.

Расчетный модуль должен быть разработан и представлен как отдельный блок с собственным интерфейсом и решениями, позволяющими передать результат тем элементам программы, которые будут использовать полученные данные для моделирования.

Кроме того, потребуются информационные окна случаев, когда данные определены не в

полном составе, отсутствуют или же требуется прервать ту или иную операцию.

После получения твердотельной модели сборочного узла блока питания требуется построить жгуты и разъемы. Предполагается, что в программном решении для этого будет разработан отдельный модуль.

Согласно рассмотренным ранее подходам и сформулированным задачам можно предложить к реализации следующую схему разработки ПО, которая представлена на рис. 1.

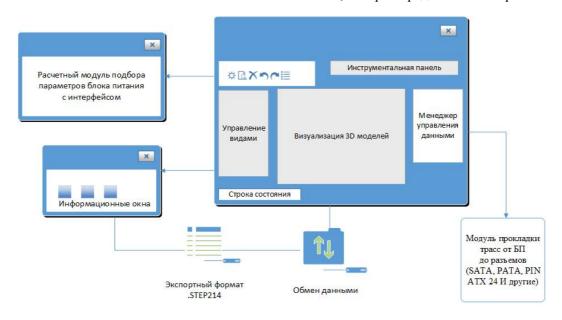


Рис. 1. Схема разработки приложения моделирования источников питания

При подготовке проекта потребуется шаблон приложения документ—модель—представление. То есть при сформированной модели должны быть средства, позволяющие управлять объектами в составе окна приложения.

Для разработки целесообразнее использовать функционал геометрического ядра Open Cascade [1, 3], которое облегчит работы не только с обменными форматами данных, но и возьмёт на себя часть операций, связанных с моделированием, а также представлением уже доступных моделей. Поэтому к проекту требуется подключение необходимых библиотек геометрического ядра.

Виды и представление элементов для просмотра деталей сборки могут быть вынесены в отдельную инструментальную панель. К типовым операциям по представлению данных относятся следующие возможности: перемещение и вращение моделей, увеличение моделей, представление моделей с закраской граней и "проволочное" представление. При компоновке блока питания можно оставить только изометрическое представление сборочной модели.

Расчеты должны учитывать возможность выбора каждого из определенных в системе устройств предполагаемой конфигурации компьютера. Видеокарты и процессоры можно разместить в виде списков с возможностью их добавления в систему. Каждой видеокарте и процессору должна соответствовать своя номинальная мощность. Все, что будет задано на предварительном этапе работ должно быть помещено в специальный контейнер с ключом в виде текста и целочисленным значением - индексом мощности. Согласно данным из контейнера будет сформирована структура. Данные структуры необходимы для процесса моделирования, поэтому если структура будет заполнена частично, процесс моделирование не начнется.

Моделирование, особенно на слабых компьютерах, может занять некоторое время. Вследствие вышесказанного, индикация процесса построения — это необходимое условие при разработке приложений. После подготовки элементов сборки источника питания формируются трассы с разъемами и производится визуализация [2]. В процессе просмотра созданной имитационной модели должна присутствовать возможность изменения цвета для сборочного узла. Кроме того, каждый элемент блока питания можно отметить отдельно и получить информацию по нему.

В приложении необходимо реализовать информирование пользователя на всех этапах работы. Для этих целей вводится дополнительное текстовые меню, где аналогичным образом можно вызвать функциональные части проекта, строка информационных сообщений, контекстное меню для быстрого выполнения действий и ряд других элементов. Согласно приведенным выше сведениям, получена функциональная модель, которая показана на рис. 2.

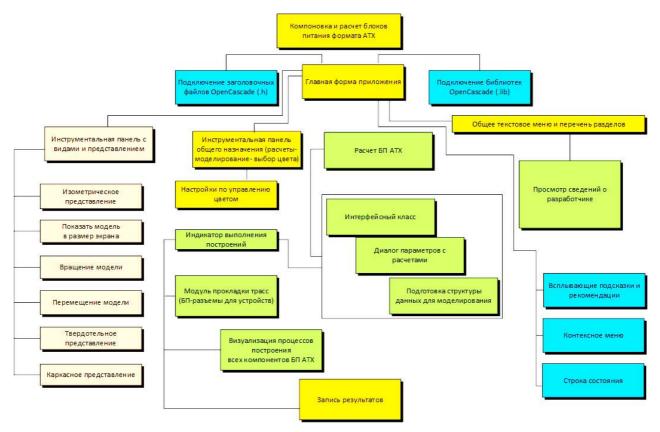


Рис. 2. Функциональная модель приложения

Разработка алгоритмической модели трасс источника питания

Построение трасс, которые представляют собой жгуты проводки определенной длины с разъемами на концах для подключения устройств, могут представлять собой кривые второго или третьего порядка, построение которых производится по точкам.

В процессе моделирования потребуется создание трех ключевых точек: исходящая, промежуточная и конечная. Исходящая точка может быть размещена непосредственно на выходе из корпуса блока питания или же на одном из предыдущих разъемов. Промежуточная точка не соприкасается с разъемами, но находится в одной плоскости с конечной точкой. Конеч-

ная точка всегда размещена на последующем разъеме. Если разъем для подключения всего один, значит точка будет единственной.

Полученные точки должны быть сохранены в отдельный список, после чего выясняется, сколько целевых разъемов для подключения устройств требуется. При получении значения количества разъемов данные по точкам переносятся в специальный массив, а список освобождается для внесения последующей группы данных.

По точкам из массива строится кривая Безье и, если функционал геометрического ядра позволяет преобразовать полученную кривую до ребра, трасса отображается на экране. Предварительно надо определить толщину и цвет трековой линии. В общем случае потребуется

преобразование кривой до NURBS и проделать аналогичные действия. На рис. 3 показан разработанный алгоритм для прокладки трасс между разъемами блока питания стандарта ATX.

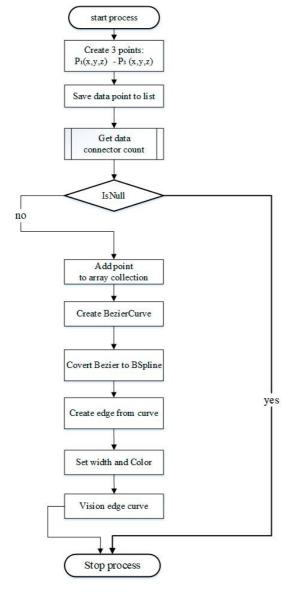


Рис. 3. Алгоритм построения трасс для подключения устройств к ПК

Реализация приложения

Программная реализация состоит из трех основных частей:

- выбор и расчет параметров блока питания с подготовкой структуры для моделирования;
- загрузка твердотельных моделей в систему и их окончательная компоновка в составе сборки:
- прокладка трасс между выходом из блока питания до разъемов подключения.

Модель проектируемого приложения представлена несколькими классами, которые отвечают за определенные задачи по созданию твердотельной модели блока питания. Использовать сразу несколько отдельных классов является нормальной практикой при разработке программ с возможностью расширения их функциональных возможностей. Такая возможность появляется только с применением объектно-ориентированного подхода проектирования приложений.

class MainWindow — определяет шаблон приложения, которое позволяет работать с документом в отдельном окне. При этом можно использовать интерфейсные возможности по управлению данными в указанном формате приложения: текстовое и контекстное меню, инструментальные панели, виджеты и менеджеры проектов, строку состояния.

class FormCalculate – класс определяет интерфейс диалогового окна по расчетам параметров для моделирования блока питания. Кроме того, имеет доступ к методам расчета данных, файлам с перечнем оборудования и заполнения специальных структур, которые требуются в процессе моделирования.

class VisualScreenContext – класс отвечает за визуализацию и представление моделей в отдельном окне приложения. Кроме того, в классе присутствует реализация по работе с экспортными форматами данных.

class psATXCascade – основной класс, который содержит функционал по построению моделей элементов блока питания, построения трасс от блока питания к целевым устройствам персонального компьютера.

Итогом разработки является создание программного обеспечения по получению твердотельной модели источника питания ЭВМ согласно выбранным условиям и заданному набору компонентов элементной базы персонального компьютера.

Работа с приложением начинается с выбора комплектующих персонального компьютера, по мощности которых будет выполнен общий расчет (рис. 4).

Для моделирования в разработанной программе выбирается раздел "Моделирование". Процесс может занимать несколько минут, поэтому в программе предусмотрен специальный индикатор процесса, позволяющий оценить время полного построения сборочного узла.

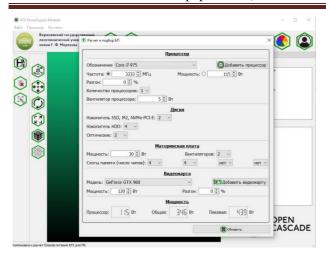


Рис. 4. Выбор расчетных параметров

После завершения процесса в отдельном окне приложения будет представлена сборочная модель системы питания персонального компьютера с перечнем компонентов в списке, отвечающих за состав изделия (рис. 5).

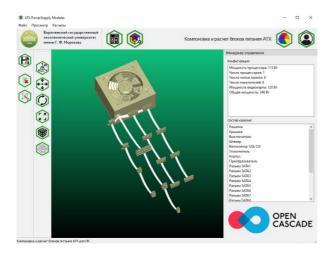


Рис. 5. Отображение блока питания формата ATX в приложении

Выводы

Реализация приложения была выполнена на функционале геометрического ядра Ореп Cascade. В ходе работы была получена твердотельная модель конструкции блока питания с построением трасс от корпуса блока до разъёмов подключения электронных устройств персонального компьютера. Разработанное программное решение показало в эксплуатации достаточное быстродействие и стабильную работу. В разработанной системе имеется возможность для сохранения полученного результата, поэтому разработанная модель блока питания может быть передана посредством экспортных форматов в другие САПР решения, где ведется проектирование имитационных моделей комплексных решений персональных вычислительных систем.

Литература

- 1. Еремин И.А., Рыжков В.А., Килина А.А. Ореп CASCADE инструмент для разработки системы автоматизированного проектирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 12-2. С. 82-85.
- 2. Visualization of metalworking processes in the development of simulation programs for equipment with numerical control / A.N. Yurov, M.I. Chizhov, A.V. Bredikhin, V.V. Lavlinsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2020. P. 32092.
- 3. Development of autonomous software solutions based on geometric cores to create digital assembly models of machine tools / A.N. Yurov, M.I. Chizhov, V.V. Vetokhin, V.V. Lavlinsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. P. 52063.

Поступила 22.06.2021; принята к публикации 23.08.2021

Информация об авторах

Юров Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(951)548-63-12

Цымбал Даниил Вадимович — магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(952)954-93-45

SIMULATION OF DESIGN COMPONENTS OF POWER SUPPLY SYSTEMS FOR PERSONAL COMPUTERS

A.N. Yurov, D.V. Tsymbal

Voronezh State Technical university, Voronezh, Russia

Abstract: we propose the development of a digital model of the product, which is a computer component - a pulsed power supply. We carried out the analysis of the expected components of the personal computer that will be installed in the system. If necessary, there is a choice with the addition of new components to the system unit of the computer. After determining the specified PC components, the power is calculated, which is needed to obtain stable operation of the system as a whole. According to the calculations made, 3D-modeling of the power supply unit with connectors for connecting the motherboard, video card, as well as other devices, including information storage devices, is performed. The paper investigates the issues of using linear programming methods for solving the assigned tasks in accordance with the initial data, as well as approaches to obtaining a 3D model of a power supply with constructed routes to the connectors for connecting devices and components of a personal computer. In addition, we prepared the software, in which the process of building an assembly model of a power supply unit is visually presented according to the calculations

Key words: design modules, imported 3D models, construction of routes, geometric core of Open Cascade

References

- 1. Eremin I.A., Ryzhkov V.A., Kilina A.A. "Open CASCADE a tool for the development of a computer-aided design system", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*), 2012, vol. 8, no. 12-2, pp. 82-85.
- 2. Yurov A.N., Chizhov M.I., Bredikhin A.V., Lavlinsky V.V. "Visualization of metalworking processes in the development of simulation programs for equipment with numerical control", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2020, pp. 32092.
- 3. Yurov A.N., Chizhov M.I., Vetokhin V.V., Lavlinskiy V.V "Development of autonomous software solutions based on geometric cores to create digital assembly models of machine tools", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2020, pp. 52063.

Submitted 22.06.2021; revised 23.08.2021

Information about the authors

Aleksey N. Yurov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel. +7 (951) 548-63-12

Daniil V. Tsymbal, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel. +7 (952) 954-93-45

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.002 УДК 004.9

ОРГАНИЗАЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ БЕГОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ОБУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ

А.Д. Обухов, Д.Л. Дедов, В.В. Вострикова, Д.В. Теселкин, Е.О. Суркова

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

Аннотация: одним из современных инструментов организации процесса обучения специалистов является использование виртуальных тренажерных комплексов, позволяющих смоделировать штатные и аварийные сценарии профессиональной деятельности и выработать необходимые компетенции у обучающихся. Существующие подходы к взаимодействию с виртуальной реальностью в рамках тренажерных комплексов основаны на использовании различного рода контроллеров, что негативно сказывается на иммерсивности процесса обучения. Контроллеры также не позволяют смоделировать физическую нагрузку, возникающую при ходьбе или беге при подготовке специалистов в ряде областей (МЧС, военная отрасль, горнодобывающая промышленность и другие). Для решения этой задачи необходимо использование различных беговых платформ. В рамках исследования выявлены определенные проблемы существующих подходов к взаимодействию с виртуальной реальностью посредством беговой платформы. Для их решения предлагается разработка новых методов управления платформой. В работе рассмотрено несколько алгоритмов управления платформой: линейный, нелинейный и нелинейный модифицированный. Представлено математическое описание алгоритмов и проведены экспериментальные исследования, позволяющие выбрать оптимальный алгоритм управления в соответствии с набором определенных метрик. Использование разработанного алгоритма управления позволит улучшить качество взаимодействия обучающего с виртуальной реальностью на беговой платформе. Полученные результаты могут быть использованы при организации процесса обучения специалистов с применением систем виртуальной реальности

Ключевые слова: виртуальная реальность, беговая платформа, алгоритм управления беговой платформой

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00660 и лаборатории медицинских VR тренажерных систем для обучения, диагностики и реабилитации

Введение

В настоящее время существует проблема подготовки специалистов во многих отраслях: машиностроении, химии, горнодобывающей, транспортной, военной и т.д., где для выработки необходимого уровня компетенций использования только теоретического материала недостаточно. Поэтому необходима комплексная подготовка с выработкой необходимых практических навыков, мышечной памяти [1].

В качестве возможного решения можно использовать системы на основе виртуальной реальности (VR) [1, 2]. Однако в этом случае возникает проблема перемещения в виртуальной реальности при взаимодействии с предметами, т.к. нельзя одновременно ходить и двигать предметы. При управлении камерой посредством контроллеров пользователь переносится (телепортируется) в выбранное место, что по визуальным и физическим ощущениям не соответствует привычному процессу перемещения [3].

Данную проблему можно разрешить путем разработки новых систем обучения специалистов на основе беговых дорожек для отделения процесса перемещения от комплексов VR, что подтверждается успешными исследованиями, представленными в работах [4, 5]. Такие системы [5] позволят обеспечить, в частности, реалистичность перемещения, использование рук для взаимодействия с предметами и, в целом, необходимую физическую подготовку специалистов.

Однако современные беговые платформы не обеспечивают комфортного перемещения: этому препятствуют законы их функционирования, наличие программного и аппаратного запаздывания [6]. Конструкция таких платформ не всегда позволяет выработать необходимый уровень физических нагрузок (например, основанная на принципе скольжения [6]), а система управления платформой может быть недостаточно эффективной и точной (ввиду особенностей используемых датчиков [7]). Поэтому актуальной задачей является организация взаимодействия с VR на основе управляемой беговой дорожки с разработкой новых алгоритмов и подходов управления, позволяющих повысить

комфортность перемещения и степень погружения в виртуальное окружение.

Целью исследования является реализация алгоритма управления беговой платформой, который сможет корректно реагировать на действия пользователя и ограничивать его перемещения, т.е. позволит человеку передвигаться только в определенной области. Это позволит удержать пользователя в «рабочей» зоне дорожки и сохранить эффект от естественного перемещения. Обеспечиваться это должно за счет выбора оптимальной скорости перемещения полотна беговой платформы, соответствующей скорости движения человека. Для этого могут использоваться различные датчики [7], системы обратной связи [8], оптические сенсоры и разделение на зоны [9] и другие подходы.

В рамках статьи рассматривается несколько подходов — линейный, нелинейный, модифицированный нелинейный, их сравнение и оценка на качество погружения в виртуальную реальность при комплексной подготовке специалистов.

Подходы к взаимодействию с виртуальной реальностью

Рассмотрим в формализованном виде процессы, протекающие при перемещении человека по беговой платформе [10]. Основной характеристикой пользователя платформы является его текущее положение и направление движения:

$$z_n = \frac{z}{|z|},\tag{1}$$

где z_n - направление движения человека;

z - текущее положение человека.

На основе положения человека возможно определить необходимую скорость движения полотна беговой дорожки, которая может быть задана различными алгоритмами:

$$speed_{lin}(z) = \frac{\left(\left|z\right| - z_0\right) speed_{\max}}{1 - z_0},$$
 (2)

где $speed_{lin}(z)$ - функция расчета скорости на основе линейного алгоритма в зависимости от текущего положения человека z и удаленности от стартовой точки z_0 ;

 $\mathit{speed}_{\mathrm{max}}$ - максимально возможная скорость дорожки.

$$speed_{par}(z) = \frac{\left(|z| - z_0\right)^2 speed_{max}}{1 - z_0},$$
 (3)

где $speed_{par}(z)$ - функция расчета скорости на основе нелинейного (параболического) алгоритма в зависимости от удаленности от стартовой точки.

$$speed_{sq}(z) = \frac{(|z| - z_0)^{0.6} speed_{max}}{1 - z_0},$$
 (4)

где $speed_{sq}(z)$ - функция расчета скорости на основе нелинейного (модифицированного) алгоритма в зависимости от удаленности от стартовой точки.

Полученное в формулах (2)-(4) значение скорости используется для расчета итоговой скорости беговой платформы с учетом местонахождения обучающего и текущего направления его движения:

$$V(speed) = \begin{cases} 0, z < z_0, \\ z_n \min(speed_{\max}, speed), z_0 \le z \le 1, (5) \\ z_n speed_{\max}, z > 1, \end{cases}$$

где V(speed) - система правил для задания скорости при нахождении человека в различных зонах: безопасной, рабочей и за ее пределом с ограничением максимальной скорости.

Осуществим сравнение алгоритмов (2)-(4) в диапазоне изменения положения человека z от 0.1 до 1.5 (рис. 1). В качестве начальной точки используется $z_0=0.1$. Рабочая область дорожки находится на отрезке [0.1;1]. Таким образом, общая длина беговой платформы — 1 метр, из них 0.1 метра — безопасная зона.

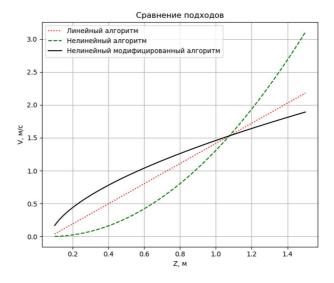


Рис. 1. Сравнение алгоритмов управления

Линейный алгоритм, увеличивая или уменьшая скорость полотна пропорционально изменению скорости движения человека, рав-

номерно регулирует скорость на всей длине рабочей области платформы.

Нелинейный (параболический) алгоритм изменяет скорость беговой платформы плавно, скорость начинает значительно возрастать только за пределами рабочей области, что является существенным недостатком: с учетом возможного программного и аппаратного запаздывания такое поведение платформы может повлечь значительное отставание скорости платформы от текущей скорости человека.

Нелинейный модифицированный алгоритм на начальном этапе движения быстрее реагирует на изменение положения человека на дорожке относительно остальных вариантов. Таким образом, такое поведение позволит сократить эффект запаздывания, особенно в начале движения полотна при разгоне платформы.

Сравнение подходов к управлению беговой платформой показало, что нелинейный модифицированный алгоритм обеспечивает наибольшее нарастание скорости в начальном участке рабочей зоны, отличающимся наиболее выраженным эффектом аппаратного запаздывания.

Далее необходимо экспериментально оценить изменение траектории человека при перемещении по беговой платформе при различных алгоритмах управления.

Экспериментальное сравнение подходов

Разработанные алгоритмы на основе анализа расстояния, на которое удалился человек от точки старта, увеличивают или уменьшают скорость беговой дорожки, но по различным законам. Для определения наилучшего алгоритма сравним траектории перемещения человека. Для этого запишем траекторию изменения положения тела человека без учета влияния скорости дорожки и будем использовать ее в качестве входных данных для каждого алгоритма. Таким образом, условия для всех трех экспериментов будут идентичными, а результаты будут соответствовать перемещению человека при различных алгоритмах управления.

Рассмотрим траекторию перемещения человека при линейном алгоритме управления беговой платформой (рис. 2).

На рис. 2 (сверху) отражена траектория человека при движении по дорожке с выбранным алгоритмом управления, а на графике снизу отражена скорость беговой платформы в соответствующие моменты времени. Из начального положения (точки 0) за счет эффекта за-

паздывания пользователь смог дойти до положения 0.78 м, после чего был возвращен в безопасную зону. Далее линейный алгоритм также допустил значительное отклонение — вплоть до 0.9057 м, что близко к концу рабочей зоны платформы. Можно заметить, что ввиду линейности алгоритма управления скорость платформы следует пропорционально за положением человека.

При линейном подходе к управлению человек в среднем удаляется от начальной точки на расстояние 0.2783 м. Суть данного подхода состоит в том, что скорость дорожки изменяется пропорционально положению человека. При резком изменении скорости человека из-за запаздывания аппаратных и программных средств дорожки алгоритм реагирует недостаточно быстро, т.к. человеку удалось отойти от точки старта на расстояние 0.9057 м.



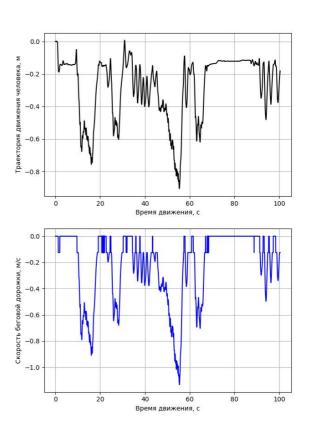


Рис. 2. Траектория движения человека и скорость беговой дорожки при линейном алгоритме управления

Нелинейный алгоритм, поведение которого отражено на рис. 3, реагирует на изменение скорости движения человека хуже, чем линейный. Скорость нарастает медленнее, что приводит к большим отклонениям от начальной точки.

Данный подход к управлению беговой платформой реализует плавное увеличение скорости в начале движения и резкое – ближе к концу рабочей зоны. Однако на практике такая плавность привела к ухудшению траектории движения человека: отклонение от точки старта в среднем составило 0.3589 м. Алгоритм реагирует на изменение положения человека с той же динамикой, что и линейный. Наибольшее отклонение от начальной точки составило 0.9637 м.

Нелинейный алгоритм

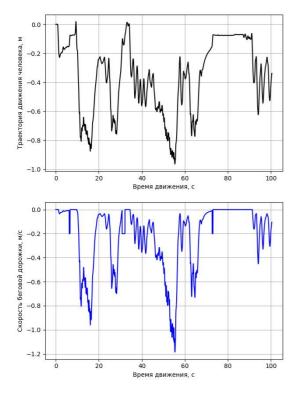


Рис. 3. Траектория движения человека и скорость беговой дорожки при нелинейном алгоритме управления

Далее рассмотрим нелинейный модифицированный алгоритм, в основе которого более резкое изменение скорости в начальные этапы движения. Траектория и скорость дорожки при таком алгоритме управления представлены на рис. 4.

Нелинейный модифицированный алгоритм не позволил человеку удалиться от начальной точки на расстояние большее, чем 0.65 м. В среднем человек большую часть времени находится в точке 0.1691 м, что является наилучшим результатом в сравнении с рассмотренными выше алгоритмами.

Для оценки качества алгоритмов управления используем следующий подход: просумми-

руем модули значений отклонения положения объекта от нулевой позиции и найдем их среднее арифметическое (Z_{CP}). Чем меньше данная величина, тем меньше колебался объект наблюдения (пользователь) и тем больше он находился в одном положении, несмотря на собственные перемещения. Также рассчитаем максимальное отклонение от нулевой точки (Z_{MAX}), дисперсию положения человека (D_z), стандартное отклонение положения человека (σ_z) [11].

Нелинейный модифицированный алгоритм

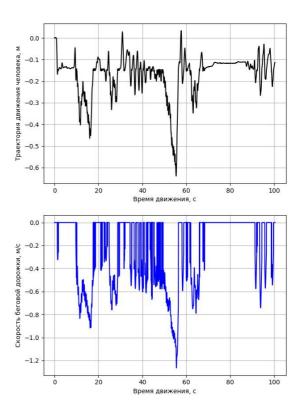


Рис. 4. Траектория движения человека и скорость беговой дорожки при нелинейном модифицированном алгоритме управления

Результаты вычислений представлены в таблице. Наилучшие результаты ключевых метрик выделены.

Результаты сравнения траекторий движения человека при различных подходах к управлению

Алгоритм	Z_{CP}	Z_{MAX}	D_z	σ_{z}
Линейный	0.278	0.905	0.038	0.195
Нелинейный	0.358	0.963	0.063	0.250
Модиф. нели- нейный	0.169	0.638	0.009	0.097

Таким образом, нелинейный модифицированный алгоритм показывает наилучшие результаты по основным метрикам: среднему отклонению от начальной точки, максимальному отклонению и имеет минимальную дисперсию положения человека.

Обсуждение результатов

В результате исследования были реализованы такие алгоритмы управления, как линейный, нелинейный, нелинейный модифицированный. Сравнение данных подходов к управлению беговой платформой показало, что нелинейный модифицированный алгоритм быстрее реагирует на изменение скорости движения человека, а также имеет наилучшие показатели по среднему отклонению от начальной точки, максимальному отклонению и имеет минимальную дисперсию положения человека (таблица).

Однако возможно дальнейшее улучшение данного подхода за счет дополнительного алгоритмического обеспечения, применения интеллектуальных подходов, варьирования коэффициентами расчетной формулы скорости беговой платформы. Даже рассмотренный нелинейный модифицированный алгоритм допускает перемещение пользователя на значительные расстояния от начальной точки. В ходе дальнейших исследований планируется улучшить показатели по основным метрикам и сократить среднее и максимальное отклонения от стартового положения для повышения комфорта пользователя.

Проведённый анализ подходов к организации управления беговыми платформами с применением различного рода датчиков [9] или камер [12] показал, что в дальнейших исследованиях используемый датчик может быть заменен на более совершенные инструменты (например, машинное зрение). Важным направлением работы является улучшение конструкции беговой платформы (увеличение рабочей площади), а также реализация возможности перемещения в различных направлениях. Перспективность всенаправленной беговой дорожки подтверждается и многими зарубежными исследованиями [13]. Однако реализация подобных систем взаимодействия с виртуальной реальностью потребует дополнительных исследований и более сложных алгоритмов управления.

Заключение

Для решения проблемы подготовки специалистов в отраслях, где теоретического материала недостаточно и требуется выработка практических навыков и моделирования физической нагрузки, необходимо разработать обучающие системы на основе беговых дорожек и комплексов виртуальной реальности. Причем необходимость одновременного перемещения и взаимодействия объектами виртуальной реальности не позволяет использовать компоненты существующих комплексов VR (например, контроллеры).

В процессе создания системы управления беговой платформой разработан подход к сбору данных о перемещении человека на беговой платформе, а также выполнена обработка собранных данных. Это позволило смоделировать траекторию перемещения человека при таких алгоритмах управления беговой платформой, как линейном, нелинейном (параболическом), нелинейном модифицированном. На основе экспериментальных исследований и анализа собранных данных о траектории перемещения человека осуществлен выбор оптимального алгоритма управления: нелинейного модифицированного, который реализует более резкое изменение скорости в начальные этапы движения и показывает наилучшие результаты по ключевым метрикам.

В результате исследования отмечено, что рассмотренные подходы к управлению беговой дорожкой не обеспечивают комфортного и безопасного перемещения человека. Возможным решением данной проблемы может стать реализация алгоритма управления на основе нейронных сетей. Поэтому дальнейшим направлением исследований будет создание, обучение и внедрение нейронных сетей в алгоритмы управления беговой платформой.

Литература

- 1. Virtual technologies trends in education / J. Martín-Gutiérrez, C.E. Mora, B. Añorbe-Díaz, A. González-Marrero // EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education. 2017. Vol. 13. № 2. Pp. 469-486.
- 2. Pantelidis V. S. Reasons to use virtual reality in education and training courses and a model to determine when to use virtual reality //Themes in Science and Technology Education. 2010. Vol. 2. № 1-2. Pp. 59-70.
- 3. Comparing Real Walking in Immersive Virtual Reality and in Physical World using Gait Analysis / A. Canessa, P. Casu, F. Solari, M. Chessa // VISIGRAPP (2: HUCAPP). 2019. Pp. 121-128.

- 4. Gillies M. What is Movement Interaction in Virtual Reality for? // Proceedings of the 3rd International Symposium on Movement and Computing. 2016. Pp. 1-4.
- 5. Alqahtani A.S., Daghestani L.F., Ibrahim L.F. Environments and system types of virtual reality technology in STEM: A survey // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2017. Vol. 8. № 6. Pp. 77-89.
- 6. The slippery path to total presence: How omnidirectional virtual reality treadmills influence the gaming experience / L.O. Wehden, F. Reer, R. Janzik, W.Y. Tang, T. Quandt // Media and Communication. 2021. Vol. 9. № 1. Pp. 5-16
- 7. Kim J., Gravunder A., Park H.S. Commercial motion sensor based low-cost and convenient interactive treadmill // Sensors. 2015. Vol. 15. № 9. Pp. 23667-23683.
- 8. Sloot L.H., Van der Krogt M.M., Harlaar J. Self-paced versus fixed speed treadmill walking // Gait & posture. 2014. Vol. 39. № 1. Pp. 478-484.
- 9. Stavar A., Dascalu L.M., Talaba D. Design, test and experimental validation of a VR treadmill walking compensation device // Doctoral Conference on Computing, Electrical

- and Industrial Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. Pp. 402-409.
- 10. Обухов А.Д., Сиухин А.А. Нейросетевой метод управления адаптивной системой имитации физических нагрузок // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2020. Т. 28. № 3 (67). С. 61-74.
- 11. Martinez M.N., Bartholomew M.J. What does it "mean"? A review of interpreting and calculating different types of means and standard deviations // Pharmaceutics. 2017. Vol. 9. N 2. Pp. 14. URL: https://doi.org/10.3390/pharmaceutics9020014
- 12. Making virtual walking real: Perceptual evaluation of a new treadmill control algorithm / J.L. Souman, P.R. Giordano, I. Frissen, A.D. Luca, M.O. Ernst // ACM Transactions on Applied Perception (TAP). 2010. Vol. 7. № 2. Pp. 1-14
- 13. Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments: an overview of the CyberWalk project / I. Frissen, J.L. Campos, M. Sreenivasa, M.O. Ernst // Human walking in virtual environments. 2013. Pp. 113-144.

Поступила 22.06.2021; принята к публикации 20.08.2021

Информация об авторах

Обухов Артем Дмитриевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106), e-mail: obuhov.art@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3450-5213

Дедов Денис Леонидович – канд. техн. наук, директор ЦКП «Цифровое машиностроение», Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, Советская, 116), e-mail: hammer68@mail.ru

Вострикова Виктория Васильевна — студент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106), e-mail: vostrikovaviktoria@yandex.ru

Теселкин Даниил Вячеславович – студент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106), e-mail: dteselk@mail.ru **Суркова Екатерина Олеговна** – студент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106), e-mail: esur2506@yandex.ru

ORGANIZATION OF INTERACTION WITH VIRTUAL REALITY BASED ON A RUNNING PLATFORM FOR COMPREHENSIVE TRAINING OF SPECIALISTS

A.D. Obukhov, D.L. Dedov, V.V. Vostrikova, D.V. Teselkin, E.O. Surkova

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract: one of the modern tools for organizing the training process for specialists is the use of virtual training complexes, which make it possible to simulate regular and emergency scenarios of professional activity and develop the necessary competencies for students. Existing approaches to interacting with virtual reality within the framework of training complexes are based on the use of various kinds of controllers, which negatively affects the immersiveness of the learning process. The controllers also do not allow simulating the physical activity that occurs when walking or running, which is necessary when training specialists in a number of areas (Ministry of Emergency Situations, the military industry, the mining industry, and others). To solve this problem, it is necessary to use different running platforms. The study identified certain problems of existing approaches to interacting with virtual reality through a running platform. To solve them, we propose to develop new methods of platform management. The paper considers several algorithms for platform control: linear, nonlinear and nonlinear modified. We present a mathematical description of the algorithms, we carried out experimental studies, which make it possible to choose the optimal control algorithm in accordance with a set of certain metrics. The use of the developed control algorithm will improve the quality of the teacher's interaction when interacting with virtual reality on the running platform. The results obtained can be used in organizing the process of training specialists using virtual reality systems

Key words: virtual reality, running platform, running platform control algorithm

Acknowledgments: the study was supported with the financial support of the RFBR grant in the framework of the scientific project No. 19-07-00660 and the laboratory of medical VR simulation systems for training, diagnostics and rehabilitation

References

- 1. Martín-Gutiérrez J., Mora C.E., Añorbe-Díaz B., González-Marrero A. "Virtual technologies trends in education", EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 2017, no. 13(2), pp. 469-486.
- 2. Pantelidis V.S. "Reasons to use virtual reality in education and training courses and a model to determine when to use virtual reality", *Themes in Science and Technology Education*, 2010, no. 2(1-2), pp. 59-70.
- 3. Canessa A., Casu P., Solari F., Chessa M. "Comparing real walking in immersive virtual reality and in physical worldusing gait analysis", 2019, VISIGRAPP (2: HUCAPP) pp. 121-128.
- 4. Gillies M. "What is movement interaction in virtual reality for?", *Proc. of the 3rd Int. Symp. on Movement and Computing*, 2016, pp. 1-4.
- 5. Alqahtani A.S., Daghestani L.F., Ibrahim L.F. "Environments and system types of virtual reality technology in STEM: A survey", *Int. J. of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2017, no. 8(6), pp. 77-89.
- 6. Wehden L.O., Reer F., Janzik R., Tang W.Y., Quandt T. "The slippery path to total presence: How omnidirectional virtual reality treadmills influence the gaming experience", *Media and Communication*, 2021, no. 9(1), pp. 5-16.
- 7. Kim J., Gravunder A., Park H.S. "Commercial motion sensor based low-cost and convenient interactive treadmill", *Sensors*, 2015, no. 15(9), pp. 23667-23683.
- 8. Sloot L.H., Van der Krogt M.M., Harlaar J. "Self-paced versus fixed speed treadmill walking", *Gait&posture*, 2014, no. 39(1), pp. 478-484.
- 9. Stavar A., Dascalu L.M., Talaba D. "Design, test and experimental validation of a VR treadmill walking compensation device", *Doctoral Conf. on Computing, Electrical and Industrial Systems*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 402-409.
- 10. Obukhov A.D., Siukhin A.A., "Neural network control method for an adaptive system for imitation of physicalloads", 2020, Samara State University Journal (Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta), 2020, vol. 28, no. 3 (67), pp. 61-74.
- 11. Martinez M.N., Bartholomew M.J. "What does it "mean"? A review of interpreting and calculating different types of means and standard deviations", *Pharmaceutics*, 2017, no. 9 (2), pp. 14, available at: https://doi.org/10.3390/pharmaceutics9020014
- 12. Souman J.L., Giordano P.R., Frissen I., Luca A.D., Ernst M.O. "Making virtual walk in greal: Perceptual evaluation of a new treadmill control algorithm", *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2010, no. 7(2), pp. 1-14.
- 13. Frissen I., Campos J.L., Sreenivasa M., Ernst M.O. "Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments: an overview of the CyberWalk project", *Human Walking in Virtual Environments*, 2013, pp. 113-144.

Submitted 22.06.2021; revised 20.08.2021

Information about the authors

Artem D. Obukhov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: obuhov.art@gmail.com. https://orcid.org/0000-0002-3450-5213

Denis L. Dedov, Cand. Sc. (Technical), Director of the Digital Engineering Center, Tambov State Technical University (116 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: hammer68@mail.ru

Viktoriya V. Vostrikova, student, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: vostrikovaviktoria@yandex.ru

Daniil V. Teselkin, student, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: dteselk@mail.ru

Ekaterina O. Surkova, student, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya str., Tambov 392000, Russia), e-mail: esur2506@yandex.ru

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.003 УДК 004.48

СЛУЧАЙНОЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЕ ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.И. Паршин¹, М.Н. Аралов^{1, 2}, В.Ф. Барабанов¹, Н.И. Гребенникова¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия ²НИИ электронной техники, г. Воронеж, Россия

Аннотация: задача распознавания изображений - одна из самых сложных в машинном обучении, требующая от исследователя как глубоких знаний, так и больших временных и вычислительных ресурсов. В случае использования нелинейных и сложных данных применяются различные архитектуры глубоких нейронных сетей, но при этом сложным вопросом остается проблема выбора нейронной сети. Основными архитектурами, используемыми повсеместно, являются свёрточные нейронные сети (CNN), рекуррентные нейронные сети (RNN), глубокие нейронные сети (DNN). На основе рекуррентных нейронных сетей (RNN) были разработаны сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и сети с управляемыми реккурентными блоками (GRU). Каждая архитектура нейронной сети имеет свою структуру, свои настраиваемые и обучаемые параметры, обладает своими достоинствами и недостатками. Комбинируя различные виды нейронных сетей, можно существенно улучшить качество предсказания в различных задачах машинного обучения. Учитывая, что выбор оптимальной архитектуры сети и ее параметров является крайне трудной задачей, рассматривается один из методов построения архитектуры нейронных сетей на основе комбинации свёрточных, рекуррентных и глубоких нейронных сетей. Показано, что такие архитектуры превосходят классические алгоритмы машинного обучения

Ключевые слова: случайное мультимодальное глубокое обучение, машинное обучение, глубокое обучение, искусственная нейронная сеть, свёрточная нейронная сеть

Введение

Возрастающие требования к точности распознавания изображений диктуют постоянное совершенствование методов машинного обучения для надежной категоризации этих данных. С каждым годом появляются все новые и новые методы и подходы к построению ансамблей нейронных сетей.

В последние годы были достигнуты значительные успехи в создании глубоких (DNN) и многоуровневых свёрточных (CNN) нейронных сетей. Появилось много разновидностей рекуррентных нейронных сетей, таких как сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и сети с управляемыми рекуррентными блоками (GRU).

Растущие вычислительные возможности позволяют производить расчет сложных ансамблей нейронных сетей, однако, нахождение оптимальной структуры является сложной задачей, требующей больших временных затрат и высокой квалификации исследователей.

Случайное мультимодальное глубокое обучение

Случайное мультимодальное глубокое обучение (RMDL) - это новый метод, который

можно использовать в различных задачах классификации [1]. RMDL улучшает точность и надежность предсказания ансамбля глубоких нейронных сетей, одновременно решая проблему нахождения наилучшей структуры. Случайное мультимодальное глубокое обучение обеспечивает автоматизированное создание оптимальной структуры нейронной сети, экономя много времени и усилий. Метод создает несколько моделей свёрточной нейронной сети (CNN), глубокой нейронной сети (DNN) и рекуррентной нейронной сети (RNN) одновременно, тренирует их и объединяет полученные результаты для получения лучшего предсказания [2], [3].

Глубокая нейронная сеть (DNN) - это нейронная сеть с несколькими скрытыми слоями. Если слоев больше трех, такая сеть называется глубокой. Первый слой нейронной сети является входным слоем, последний слой - выходным слоем, средние слои являются скрытыми слоями. Между собой все слои полностью связаны, то есть любой нейрон в текущем слое связан с любым нейроном как в предыдущем, так и в последующем слое. Глубокая нейронная сеть имеет набор весов и смещений на каждом уровне. Активация нейрона зависит от соответствующих весов и смещений. Задачей обучения глубокой нейронной сети является нахождение наилучших весов и смещений для каждого элемента сети.

© Паршин А.И., Аралов М.Н., Барабанов В.Ф., Гребенникова Н.И., 2021

Свёрточная нейронная сеть (CNN) - разновидность глубоких нейронных сетей, наиболее часто применяемая в задаче анализа визуальных образов. Идея свёрточных нейронных сетей заключается в последовательном чередовании свёрточных, фильтрующих (подвыборочных) и полносвязных слоёв. Свёрточный слой представляет собой применение операции свёртки к выходным данным предыдущего слоя. Фильтрующий слой необходим для снижения размерности изображения. На данном слое исходное изображение делится на блоки и для каждого блока вычисляется определенная функция. На свёрточном слое уже были выявлены некоторые признаки, для дальнейшей обработки столь подробное изображение уже не требуется, и оно уплотняется до менее детального. Также фильтрация уже ненужных деталей служит для уменьшения эффекта переобучения нейронной сети. Полносвязный слой служит итоговой классификации, моделирует сложную нелинейную функцию, оптимизируя которую, улучшается качество распознавания.

Рекуррентная нейронная сеть (RNN) - еще один тип нейронной сети, используемый в методе RMDL. RNN является в некотором роде искусственной нейронной сетью, соединения между узлами которой образуют направленный граф. Идея рекуррентной нейронной сети состоит в том, чтобы создать множество копий с одной и той же архитектурой, каждая предыдущая копия передает данные следующему слою. Таким образом, рекуррентная нейронная сеть может использовать свое внутреннее состояние для обработки последовательностей различной длины. В последнее время было разработано большое количество различных архи-

тектурных вариаций сетей RNN, но наибольшее распространение получили сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM) и управляемый рекуррентный блок (GRU).

Долгая краткосрочная память (LSTM) является специальным типом рекуррентной нейронной сети. LSTM не использует функцию активации, в результате не происходит размытия хранимого значения. Это помогает решить проблему исчезающего градиента при использовании для обновления весов нейронной сети метода обратного распространения ошибки. LSTM показывает достаточно высокие результаты в задачах классификации, распознавания речи и прогнозирования временных рядов с неопределенной продолжительностью временных лагов между важными событиями [4].

Управляемые рекуррентные блоки (GRU) по эффективности сравнимы с сетями долгой краткосрочной памяти во многих практических задачах, но имеют меньше обучаемых параметров, что уменьшает время обучения при одинаковом размере скрытого слоя. Архитектура блока GRU имеет много общего с блоком LSTM, отличие заключается в организации долгосрочного элемента памяти: в блоке LSTM элемент памяти реализован отдельным каналом, в блоке GRU - в векторе скрытого состояния. Как и в случае сети долгой краткосрочной памяти, сеть GRU решает проблему исчезающего градиента, характерную для простой рекуррентной сети [5].

На рис. 1 представлена обобщенная структура модели RMDL. Количество слоев и узлов каждой из этих моделей глубокой нейронной сети выбирается случайным образом.

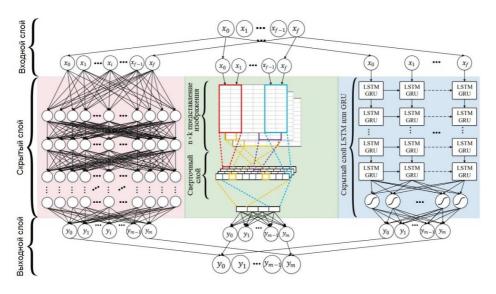


Рис. 1. Общая структура модели случайного мультимодального глубокого обучения

Для двоичной классификации математическое ожидание прогноза модели RMDL можно найти по формуле [6]:

$$M(y_{i1}, y_{i2}, ..., y_{in}) = \left[\frac{1}{2} + \frac{\left(\sum_{j=1}^{n} y_{ij}\right) - \frac{1}{2}}{n}\right],$$
 (1)

где n - количество случайных моделей, а у_{іј}-выходное предсказание модели ј для каждого класса і. Предсказание полученного ансамбля моделей для каждого класса будет зависеть от предсказания каждой модели для данного класса:

$$\hat{y}_i = [\hat{y}_{i1} \dots \hat{y}_{ij} \dots \hat{y}_{in}]^T . \tag{2}$$

Предсказания для каждой модели, в свою очередь, будут определяться следующим образом:

$$\hat{y}_{ij} = \arg\max_{k} [softmax(y_{ij})]. \tag{3}$$

Оценка точности модели случайного мультимодального глубокого обучения

Для оценки точности предсказания модели случайного мультимодального глубокого обучения воспользуемся двумя различными наборами данных. В качестве первого набора данных используем набор рукописных арабских цифр из базы данных MNIST. Этот набор данных содержит 60 000 тестовых и 10 000 тренировочных черно-белых изображений размером 28 × 28 пикселей. На рис. 2 показана зависимость полученной ошибки от количества случайных моделей. Как видим, график зависимости (рис. 2) имеет нелинейный характер, после определенного момента увеличение количества моделей не приводит к снижению ошибки обучения.

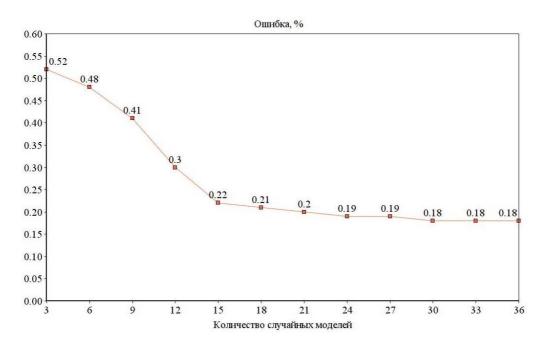


Рис. 2. Зависимость ошибки предсказания от количества тренируемых моделей для базы данных рукописных цифр MNIST

На базе данных MNIST были опробованы алгоритмы двухуровневой нейронной сети [7], нелинейного классификатора [8], метод опорных векторов и к ближайших соседей [9]. Кроме того, были построены модели линейного классификатора [8], градиентного бустинга [10], а также шестиуровневой свёрточной нейронной сети [11]. Таким образом, количе-

ство результатов применения MNIST является статистически достаточным для проведения сравнительного анализа. Как видим из рис. 3, точность полученной модели случайного мультимодального глубокого обучения превосходит как классические алгоритмы машинного обучения, так и сложные многоуровневые свёрточные нейронные сети.

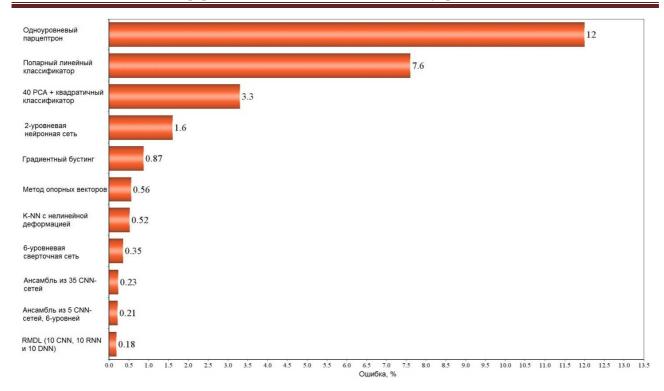


Рис. 3. Сравнение точности предсказания для различных методов машинного обучения

В качестве второго набора данных будем использовать небольшую подборку изображений человеческих лиц из базы данных Olivetti, входящих в библиотеку машинного обучения scikit-learn [12]. Этот набор данных содержит 400 различных изображений, принадлежащих 40 различным людям. Каждое изображение является черно-белым и имеет размер 64 × 64. Таким образом, у нас есть 40 классов по 10 изображений в каждом. Составим тренировочный и тестовый набор данных, выделив из каждого класса случайным образом 6 и 4 изобра-

жения соответственно. Количество эпох обучения выбиралось из расчета минимизировать ошибку и при этом не допустить переобучения. На рис. 4 представлена зависимость полученной усредненной ошибки от количества обучаемых моделей. Из-за небольшого количества данных распределение не так наглядно, как для набора данных MNIST, но и тут прослеживается схожая закономерность — после определенного уровня увеличение количества моделей не приводит к существенному уменьшению ошибки.

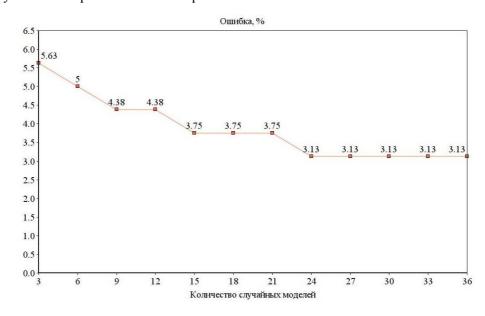


Рис. 4. Зависимость ошибки предсказания от количества тренируемых моделей для базы данных Olivetti

Заключение

В ходе проведенного исследования мы убедились, что метод случайного мультимодального глубокого обучения является эффективным алгоритмом создания сложной структуры нейронных сетей. Исходя из вышеприведенного анализа к достоинствам данного метода можно отнести высокую точность и устойчивость предсказания. Единственным недостатком модели случайного мультимодального глубокого обучения можно назвать большие вычислительные затраты. Результирующая модель содержит сложную комбинацию различных моделей нейронных сетей, расчет которых требует также больших затрат. Тем не менее подбор оптимальной модели нейронной сети исследователем является непростой задачей и также требует больших временных ресурсов.

Литература

- 1. Pandey A., Srivastava D., Thenmalar Dr.S. Fake Information Classifier Using Random Multi-Model Deep Learning // Annals of the Romanian Society for Cell Biology. 2021, P. 14839–14850. URL: https://www.annalsofrscb.ro/index.php/journal/article/view/4826
- 2. An Improvement of Data Classification Using Random Multimodel Deep Learning (RMDL) / M. Heidarysafa, K. Kowsari, D.E. Brown, K.J. Meimandi, L.E. Barnes // International Journal of Machine Learning and Computing, 2018. Vol. 8(4). P. 298-310. DOI: 10.18178/ijmlc.2018.8.4.703
- 3. Kowsari K. Diagnosis and Analysis of Celiac Disease and Environmental Enteropathy on Biopsy Images using Deep Learning Approaches // Online Archive of University of

- Virginia Scholarship, 2020. URL: https://doi.org/10.18130/v3-837s-3a79
- 4. Alex G., Abdel-rahman M., Geoffrey H. Speech Recognition with Deep Recurrent Neural Networks. Acoustics // Speech and Signal Processing (ICASSP), IEEE International Conference on: journal. 2013. P. 6645-6649.
- 5. Gomaa W.H. The Impact of Deep Learning Techniques on SMS Spam Filtering // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2020. Vol. 11. No. 1. DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110167
- 6. RMDL: Random Multimodel Deep Learning for Classification, / K. Kowsari , M. Heidarysafa , D.E. Brown , K.J. Meimandi, L.E. Barnes // ICISDM '18: Proceedings of the 2nd International Conference on Information System and Data Mining, 2018. P. 19-28. URL: https://doi.org/10.1145/3206098.3206111
- 7. Simard P., Steinkraus Y.D., Platt J.C. Best Practices for Convolutional Neural Networks Applied to Visual Document Analysis // Document Analysis and Recognition. Proceedings. Seventh International Conference on: journal. IEEE, 2003. DOI: 10.1109/ICDAR.2003.1227801
- 8. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition (PDF) / L.Yann, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner // Proceedings of the IEEE. 1998. 86 (11). P. 2278–2324. DOI: 10.1109/5.726791
- 9. Deformation models for image recognition / K. Daniel, T. Deselaers, C. Gollan, H. Ney // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2007. 29 (8). P. 1422–1435. CiteSeerX 10.1.1.106.3963. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1153
- 10. Kégl B., Busa-Fekete R. Boosting products of base classifiers // Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning. 2009. P. 497-504.
- 11. Deep Big Simple Neural Nets Excel on Handwritten Digit Recognition / C.C. Dan, U. Meier, L. M. Gambardella, J. Schmidhuber // Neural Computation. 2010. 22 (12). P. 3207–20. arXiv:1003.0358. DOI: 10.1162/NECO a 00052
- 12. Pedregosa F. Scikit-learn: Machine learning in python // Journal of Machine Learning Research, 2011. Vol. 12. P. 2825-2830.

Поступила 21.06.2021; принята к публикации 19.08.2021

Информация об авторах

Паршин Александр Иванович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexparshin20150@gmail.com

Аралов Михаил Николаевич – ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); инженер-конструктор, НИИ электронной техники (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: aralow@mail.ru

Барабанов Владимир Федорович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvf@list.ru

Гребенникова Наталия Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: g-naty@yandex.ru

RANDOM MULTI-MODAL DEEP LEARNING IN THE PROBLEM OF IMAGE RECOGNITION

A.I. Parshin¹, M.N. Aralov^{1,2}, V.F. Barabanov¹, N.I. Grebennikova¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia ²Scientific Research Institute of Electronic Engineering, Voronezh, Russia

Abstract: the image recognition task is one of the most difficult in machine learning, requiring both deep knowledge and large time and computational resources from the researcher. In the case of using nonlinear and complex data, various architectures of deep neural networks are used but the problem of choosing a neural network remains a difficult issue. The main ar-

chitectures used everywhere are convolutional neural networks (CNN), recurrent neural networks (RNN), deep neural networks (DNN). Based on recurrent neural networks (RNNs), Long Short Term Memory Networks (LSTMs) and Controlled Recurrent Unit Networks (GRUs) were developed. Each neural network architecture has its own structure, customizable and trainable parameters, and advantages and disadvantages. By combining different types of neural networks, you can significantly improve the quality of prediction in various machine learning problems. Considering that the choice of the optimal network architecture and its parameters is an extremely difficult task, one of the methods for constructing the architecture of neural networks based on a combination of convolutional, recurrent and deep neural networks is considered. We showed that such architectures are superior to classical machine learning algorithms

Key words: random multimodal deep learning, machine learning, deep learning, artificial neural network, convolutional neural network

References

- 1. Pandey A., Srivastava D., Dr. Thenmalar S. "Fake information classifier using Random Multi-Model Deep Learning", *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 2021, pp. 14839–14850, https://www.annalsofrscb.ro/index.php/journal/article/view/4826
- 2. Heidarysafa M., Kowsari K., Brown D.E., Meimandi K.J., Barnes L.E. "An improvement of data classification using Random Multimodel Deep Learning (RMDL)", *International Journal of Machine Learning and Computing*, 2018, vol. 8(4), pp. 298-310, doi: 10.18178/ijmlc.2018.8.4.703
- 3. Kowsari K. "Diagnosis and analysis of celiac disease and environmental enteropathy on biopsy images using Deep Learning approaches", Online Archive of University of Virginia Scholarship, 2020, https://doi.org/10.18130/v3-837s-3a79
- 4. Alex G., Abdel-rahman M., Geoffrey H. "Speech recognition with Deep Recurrent Neural Networks. Acoustics", *Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE Int. Conf.*, 2013, pp. 6645—6649.
- 5. Gomaa W.H. "The impact of Deep Learning Techniques on SMS spam filtering", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2020, vol. 11, no. 1, doi: 10.14569/IJACSA.2020.0110167
- 6. Kowsari K., Heidarysafa M., Brown D.E., Meimandi K.J., Barnes L.E. "RMDL: Random Multimodel Deep Learning for classification", *ICISDM '18: Proc. of the 2nd Int. Conf. on Information System and Data Mining*, 2018, pp. 19–28, doi.org/10.1145/3206098.3206111
- 7. Simard P.Y., Steinkraus D., Platt J.C. "Best practices for convolutional neural networks applied to visual document analysis", *Document Analysis and Recognition, 2003. Proc. of Seventh Int. Conf. IEEE*, 2003, doi:10.1109/ICDAR.2003.1227801
- 8. Yann L., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. "Gradient-based learning applied to document recognition", *Proc. of the IEEE*, no. 86 (11), pp. 2278–2324. doi:10.1109/5.726791
- 9. Daniel K., Deselaers T., Gollan C., Ney H. "Deformation models for image recognition", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, no. 29 (8), pp. 1422–1435. CiteSeerX 10.1.1.106.3963. doi:10.1109/TPAMI.2007.1153
- 10. Kégl B., Busa-Fekete R. "Boosting products of base classifiers", *Proc. of the 26th Annual Int. Conf. on Machine Learning*, 2009, pp. 497-504.
- 11. Dan C.C., Meier U., Gambardella L.M., Schmidhuber J. "Deep big simple neural nets excel on handwritten digit recognition", *Neural Computation*, 2010, no. 22 (12), pp. 3207–20. arXiv:1003.0358. doi:10.1162/NECO_a_00052
 - 12. Pedregosa F. "Scikit-learn: machine learning in python", J. of Machine Learning Research, 2011, vol. 12, pp. 2825-30.

Submitted 21.06.2021; revised 19.08.2021

Information about the authors

Aleksandr I. Parshin, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexparshin20150@gmail.com

Mikhail N. Aralov, assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), design engineer, Research Institute of Electronic Engineering (5 Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394033, Russia,), e-mail:aralow@mail.ru Vladimir F. Barabanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

Natal'ya I. Grebennikova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: g-naty@yandex.ru

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.004 УДК 621.039

МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СЛОЖНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Е.А. Абидова¹, А.Д. Данилов², А.Е. Дембицкий¹, А.В. Чернов¹

¹Волгодонский инженерно-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Россия ²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: предложен подход к диагностике сложного и габаритного оборудования на примере определения технического состояния дизельного двигателя. Отличительной особенностью дизельного двигателя является сложность конструкции, требующая применения комплекса методов для обеспечения полноты контроля и чувствительности при выявлении дефектов на ранних стадиях развития. Описана схема обработки данных, позволяющая повысить чувствительность при диагностике за счет комплексного анализа данных различной физической природы с использованием анализа сингулярного спектра. Повышение чувствительности обосновывается путем численного моделирования и обработки результатов измерения диагностических параметров в реальных производственных условиях. В качестве показателей чувствительности рассматриваются расстояния между координатами центров кластеров параметров исправного и неисправного состояния в исходном пространстве и в пространстве главных компонент. Продемонстрировано, что предлагаемый подход обеспечивает повышение чувствительности в условиях, когда влияние дефекта на диагностические параметры сопоставимо с действием случайных факторов в объекте диагностирования. Указанное повышение качества диагностирования достигается благодаря корреляции между параметрами за счет их представления в виде траекторных матриц. Помимо повышения чувствительности при выявлении дефектов также достигается и существенное сжатие информации, которая используется для определения состояния. Преимуществом предлагаемого подхода также является наглядная визуализация результатов

Ключевые слова: диагностика дизель-генераторного оборудования, вибродиагностика, индикаторное давление, комплексный анализ, анализ сингулярного спектра

Введение

Энергетическое оборудование, использующееся для выработки, передачи, преобразования энергии, такое как дизельные двигатели (ДД), турбины, компрессоры, насосы широко используются в различных отраслях промышленности. Для контроля технического состояния энергетического оборудования применяются современные мобильные или стационарные системы технической диагностики. Для вращающегося оборудования (электроприводные клапаны, компрессоры, насосы) широкое распространение получили комплексы ПКСОД, КСДА, Крона [1]. Для оборудования циклического действия, дизелей в отечественной промышленности получили распространение комплексы «Дизель-Адмирал», «Магистраль» [2, 3] и др. Для подъёмно-транспортного оборудования примерами систем регистрации и анализа диагностических данных является комплекс МИК [4].

Энергетическое оборудование объединяет наличие нескольких функционально связанных конструктивных узлов. Отклонение в состоянии отдельных узлов косвенно сказывается на рабочих показателях других, в том числе пространственно-удаленных. Для оценки состояния деталей энергетического оборудования широко используются методы, связанные с контролем температуры, вибрации и акустических характеристик. Наиболее универсальным методом является вибрационный контроль в процессе функционирования. В сигнале вибрации проявляются характерные диагностические признаки при дефектах подшипников и неисправности топливной аппаратуры двигателей [5]. Измерение вибрации в определенных зонах позволяет контролировать состояние сложного энергетического оборудования. Однако из-за влияния большого числа случайных факторов выявить диагностические признаки на ранних стадиях развития дефекта затруднительно.

Рабочий процесс ДД анализируется с использованием индикаторных диаграмм, которые получают путем измерения давления в цилиндре [6]. Анализ параметров индикаторных диаграмм проводится в первую очередь для

[©] Абидова Е.А., Данилов А.Д., Дембицкий А.Е., Чернов А.В., 2021

настройки топливной аппаратуры. При этом параметры давления позволяют косвенно контролировать механические нагрузки на детали топливной аппаратуры и могут учитываться при диагностике.

При обработке диагностической информации любой физической природы актуальной проблемой является повышение чувствительности определяемых диагностических признаков к зарождающимся дефектам. Очевидно, чувствительность может быть повышена за счет комплексного анализа диагностических параметров дизеля.

Были предложены различные алгоритмы обработки данных при диагностике неисправностей дизельных двигателей [7]. Подавляющее большинство существующих результатов получено при обработке сигналов вибрации [8]. В этих исследованиях представлены различные частотные методы обработки сигналов, такие как быстрое преобразование Фурье, вейвлетдекомпозиция, кумулянтные спектры и др. Применение данных методов позволяет учитывать проявление состояния оборудования только в одном измерительном канале.

Для реализации комплексного подхода в сфере технической диагностики предложен [9] новый алгоритм обработки данных, основанный на выявлении скрытой взаимосвязи между данными с помощью анализа сингулярного спектра (АСС). Диагностические признаки используются в качестве входных данных классификаторов для двухклассового (нормального или неисправного состояния) распознавания. Продемонстрировано повышение чувствительности при диагностировании электроприводного механизма за счет обработки сигналов вибрации с использованием АСС.

Подходы, представленные в работе [9], могут использоваться при диагностике ДД и другого энергетического оборудования. В настоящей работе предлагается универсальный подход к комплексной обработке данных различной физической природы и повышению наглядности представления результатов диагностирования за счет применения АСС.

Обработка диагностической информации с использованием метода анализа сингулярного спектра

АСС базируется на представлении изначально одномерных данных в виде траекторной матрицы и последующей обработки многомерных данных с помощью метода главных ком-

понент (МГК) [9]. МГК базируется на ортогональном разложении ковариационной матрицы параметров системы по направлениям, которые объясняют максимальное изменение данных. Основная цель использования МГК состоит в том, чтобы найти факторы, которые имеют гораздо меньшую размерность, чем исходный набор данных, при этом могут правильно описать основные тенденции в исходном наборе данных. Возможность сокращения размерности признакового пространства основывается на том, что информация в измерительных каналах связана отношениями корреляции.

Пусть p обозначает число параметров системы; пространство векторов будем рассматривать как матрицу Y размером $n \times p$, ковариационная матрица которой равна Σ . Строки в Y, $y1, y2, \ldots, yn-p$ -мерные вектора, соответствующие образцам; в то время как столбцы векторов размерности n соответствующих переменных. Из матричных алгебр Σ можно получить диагональную матрицу L с помощью ортонормированной матрицы $Up \times p$, то есть $\Sigma = ULU'$. Столбцы $U, u1, u2, \ldots, up$, принято называть главными компонентами (Γ K) векторов нагрузки.

Диагональные элементы L, l1, l2, ..., lp - упорядоченные собственные значения \sum . Они определяют величину дисперсии, объясняемой каждым соответствующим собственным вектором. Преобразование ГК задается следующим образом:

$$T = YU$$
 или $\theta_i = Xu_i$. (1)

Эквивалентно, Y разлагается как u'i:

$$Y = TU' = \sum_{i=1}^{p} \theta_i u'_i . \tag{2}$$

Матрица $n \times p T = (\theta 1, \theta 2, ..., \theta p)$ содержит так называемые оценки ГК, которые определяются как наблюдаемые значения главных компонент для всех n наблюдений. Учитывая тот факт, что ковариация T является диагональной матрицей, векторы θ_i некоррелированы. Пары θ_i , u_i расположены в порядке убывания в соответствии с их собственными значениями l_i .

На практике редко требуется вычислять все собственные векторы, так как большая часть вариации данных может быть представлена первыми ГК числа a. Если используется меньшее число ГК a < p, декомпозиция становится:

$$Y = \theta 1 u' 1 + \theta 2 u' 2 + ... + \theta a u' a + E = \sum_{i=1}^{a} \theta_i . u' 1 + E,$$
(3)

где Е - остаточный член.

Было обнаружено, что первых двух или трех ГК часто бывает достаточно для объяснения изменчивости. Следовательно, размерность значительно уменьшается.

Диагностики параметры в двумерном пространстве представляют собой кластеры точек, соответствующих координатам параметров в новом пространстве. Чувствительность метода можно оценить по расстоянию между центрами кластеров параметров исправного и неисправного состояния.

Применение АСС к обработке диагностических сигналов ДД требует разработки диагностической модели для обоснования повышения чувствительности.

Модель, обосновывающая повышение чувствительности

Для решения задач оптимизации и оценки качества систем диагностики в работе [10] используется методология на основе формального представления системы и описание соответствия между состоянием объекта и диагностическими признаками. Данный подход позволяет оценить и скорректировать качество диагностирования, достигаемое с использованием анализируемой системой или методикой, на этапе их разработки. В данном случае мы разрабатываем модель, которая демонстрирует возможность повышения чувствительности при диагностике дефектов ДД, за счет комплексной обработки данных различной физической природы с использованием АСС.

Формальное представление системы заключается в описании состояния объекта в многомерном пространстве. Каждое направление соответствует измеряемой физической величине - температура, вибрация, давление, ультразвук. Таким образом, описываемое пространство является четырехмерным.

Реакция системы на изменение состояния определяется отклонением её параметров от нормальных значений принятых за единицу. Формула (4) описывает формирование і-го параметра при наличии дефекта, а формула (5) соответствует і-му параметру исправного дизеля такого же типа:

$$x_i = 1 + r_i * e$$
 (4)
 $\dot{x}_i = 1 + o_i * \dot{e}$, (5)

$$\dot{x}_i = 1 + o_i * \dot{e} , \qquad (5)$$

где е - определяет степень развития дефекта и варьируется от 0,01 до 0,1, r_i – реакция і-го параметра на дефект в зависимости от природы и локализации варьируется от -1 до 1, o_i случайное значение от -1 до 1, характеризующее влияние недетерминированных факторов в исправном механизме, і меняется от 1 до 16, \dot{e} – коэффициент численно равный е (когда моделируется ранняя стадия развития дефекта).

Таким образом, каждый параметр отклоняется от единицы либо в зависимости от выраженности дефекта и способности реагировать на дефект, либо под влиянием случайных факторов. Настоящая модель имитирует ситуацию, когда величина дефекта сопоставима с влиянислучайных факторов. Такая ситуация наблюдается на ранних стадии развития дефек-

Для реализации комплексной обработки данных по формулам (4) и (5) были сгенерированы параметры вибрации температуры и давления четырехцилиндрового рядного дизеля. При наличии дефекта топливной аппаратуры наблюдается следующая тенденция: вблизи неисправного объекта вибрация, ультразвук растут, а температура и давление падают. В других точках измерения дефект наоборот вызывает снижение вибрации и ультразвука, рост температуры (чем ближе дефект, тем он сильнее сказывается на соседних точках). Эта тенденция отражена варьированием r_i в формуле 4. Параметр дефекта и коэффициент влияния недетерминированных факторов при расчете задавались $e = \dot{e} = 0.04$.

Ниже на гистограммах представлены вычисленные значения параметров, соответствующие исправному дизелю и дизелю с дефектом форсунки цилиндра № 2.

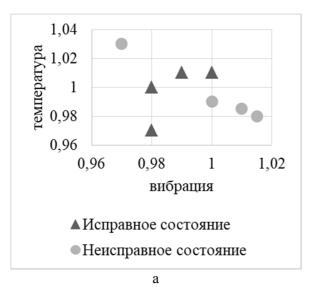
Отклонение параметров неисправного цилиндра на 4% не может считаться признаком неисправности, и дефект не может быть выявлен на основании значений параметров вибрации, температуры, ультразвука, давления. Расстояние между центрами кластеров параметров в четырехмерном пространстве составляло пять единиц, что недостаточно для постановки диагноза.

Необходима комплексная обработка данных различной физической природы по всем цилиндрам.

Для повышения чувствительности за счет корреляции между данными вычисленные параметры были представлены в виде траекторных матриц. То есть исходные ряды из 16 значений были преобразованы в матрицы размером 8 на 9 вида

$$\begin{pmatrix} x_1^v & x_1^t & x_1^u & x_1^p & \dots & x_2^p \\ x_1^t & x_1^u & x_1^p & x_2^v & \dots & x_3^v \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ x_3^v & x_3^t & x_3^u & x_3^p & \dots & x_4^p \end{pmatrix}$$
(6)

где x_i^v , x_i^t , x_i^u , x_i^p — параметры вибрации, температуры, ультразвука и давления і-го цилиндра.



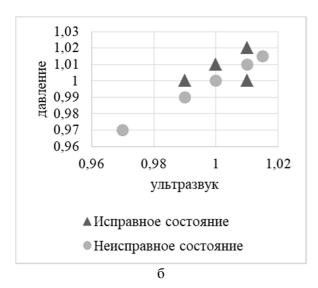


Рис. 1. Вычисленные значения параметров: а) исправного дизеля, б) дизеля с дефектом

Матрица параметров исправного состояния была преобразована в ковариационную, которая в свою очередь подверглась сингуляр-

ному разложению с получением эталонного базиса. На эталонный базис были спроецированы как матрица исправных параметров, так и матрица неисправных. Результат проецирования представлен на рис. 2.

В результате проецирования в пространстве главных компонент получилось два несовпадающих кластера, положение которых описывает состояние оборудования. Расстояние между центрами проекций данных в пространстве ГК составляет 36 единиц.

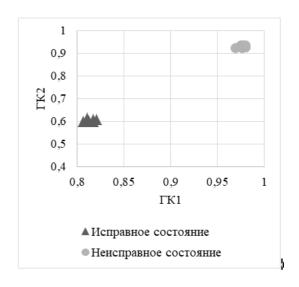


Рис. 2. Вычисленные параметры исправного и неисправного дизеля в пространстве ГК

Таким образом, моделирование начальной стадии развития дефекта показало, что применение ACC обеспечило повышение чувствительности более чем на 30%.

Для демонстрации изменения чувствительности за счет применения АСС при обработке данных проводилось моделирование различных стадий развития дефекта, путем подстановки в формулу (4) возрастающих значений параметра е. При этом оценивалось расстояние между параметрами исправного и неисправного состояния в исходном базисе и расстояние между параметрами сравниваемых состояний в пространстве ГК. Порогом чувствительности будем считать расстояние 0,1. Схема модельного эксперимента представлена на рис. 3 и отражает сравнение параметров, соответствующих исправному и неисправному объекту в естественных координатах и в пространстве ГК.

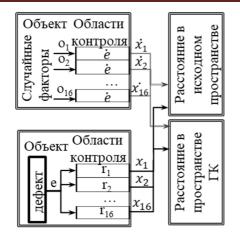


Рис. 3. Схема модельного эксперимента, обосновывающего повышение чувствительности

Таким образом, в вычислительных экспериментах были сгенерированы два набора данных, один из которых соответствует тенденции изменений параметров при наличии дефекта, а второй случайному изменению параметров сопоставимому с влиянием дефекта. Результаты расчетного эксперимента, представленные на рис. 4, показали, что за счет предлагаемой обработки данных можно выявлять дефекты на существенно более ранних стадиях развития, несмотря на влияние случайных факторов.

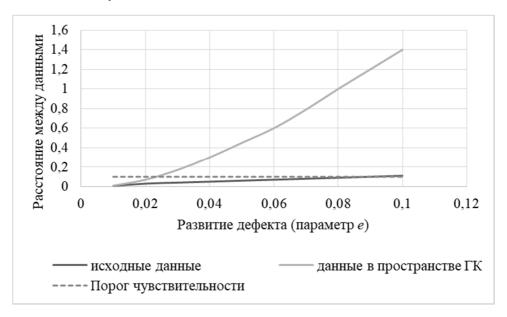


Рис. 4. Чувствительность при диагностировании

Обработка диагностических параметров, зарегистрированных в производственных условиях

Для апробации предлагаемого метода были обработаны диагностические данные дизелей одинаковой конструкции, один из которых является исправным, а в первом левом цилиндре другого развивался дефект (который впоследствии привел к заклиниванию поршня). Тип двигателя - 12zv40/48 - двенадцатицилиндровый, четырехтактный, v-образный.

Производилось измерение вибрации вблизи цилиндров дизелей. Одновременно с измерением вибрации были зарегистрированы индикаторные давления в цилиндрах диагностируемых дизелей.

Известно [11], что при наличии дефекта амплитуда сигнала вибрации, измеренного

вблизи неисправности, может возрасти. Однако сопоставление сигналов вибрации, измеренных вблизи первых левых цилиндров дизелей, один из которых неисправен, не позволяет выявить дефект. Функции плотности распределения параметров сигналов исправного и неисправного оборудования практически совпадают (рис. 5).

С целью повышения чувствительности к параметрам дизелей был применен предлагаемый подход: параметры представлены в виде траекторной матрицы, преобразованы в матрицу ковариации, путем сингулярного разложения получен эталонный базис, на первую компоненту которого спроецированы параметры двух дизелей. Как видно по рис. 6, применение предлагаемого подхода обеспечило повышение чувствительности: вероятность ошибки диагностирования снизилась до приемлемого уровня - 10%.

Для дальнейшего повышения качества диагностирования целесообразно совместно с параметрами вибрации использовать информацию, содержащуюся в параметрах давления диагностируемых ДД.

На рис. 7 представлены значения исходных (нормализованных) параметров состояния объектов: СКЗ сигналов вибраций и средних максимальных давлений сжатия по каждому цилиндру каждого дизеля. Поскольку в исходном пространстве наблюдается наложение кластеров исправного и неисправного состояний, то сделать вывод о состоянии объектов затруднительно.

Для реализации АСС из параметров ДД различной природы были составлены две матрицы 12 на 13 вида:

$$\begin{pmatrix} x_{r1}^{v} & x_{r1}^{p} & x_{l1}^{v} & x_{l1}^{p} & \dots & x_{l3}^{p} \\ x_{r1}^{p} & x_{l1}^{v} & x_{l1}^{p} & x_{r2}^{v} & \dots & x_{r4}^{v} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ x_{r5}^{v} & x_{r5}^{p} & x_{l5}^{v} & x_{l5}^{p} & \dots & x_{l6}^{p} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где x_{ri}^{ν} , x_{ri}^{p} , x_{li}^{ν} , x_{li}^{p} — нормализованные параметры вибрации и давления і-х цилиндров слева и справа. В данной матрице давление неисправного цилиндра повторяется четыре раза, а вибрация — три.

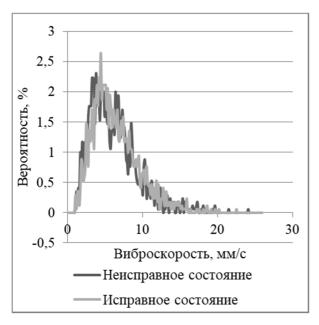


Рис. 5. Сопоставление виброскоростей левого цилиндра №1 исправного дизеля и левого цилиндра №1 дизеля с развивающимся дефектом



Рис. 6. Сопоставление проекций на первую компоненту сингулярного разложения виброскоростей левого цилиндра №1 исправного дизеля и левого цилиндра №1 дизеля с развивающимся дефектом

Дефект влияет на все параметры (пусть и в незначительной степени), и представление (7) обеспечивает выявление взаимной корреляции между ними, что в конечном итоге и позволяет повысить чувствительность. В соответствии с предлагаемой схемой обработки данных матрица исправных параметров вида (7) была преобразована в матрицу ковариации, затем подверглась сингулярному разложению, в результате которого был получен двумерный эталонный базис.

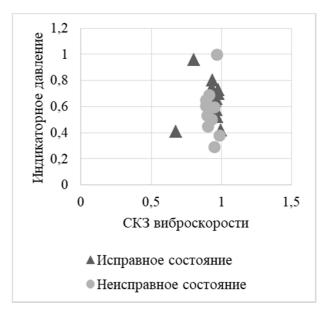


Рис. 7. Параметры исправного и неисправного дизеля в исходном пространстве

Результаты проецирования параметров исправного и неисправного ДД на базис представлены на рис. 8.

В пространстве ГК параметры исправного и неисправного оборудования формируют два несовпадающих кластера, что исключает неверное диагностирование. В исходных координатах расстояние между центрами кластеров исправного и неисправного состояний составило 0,11, а в пространстве ГК 0,77. Таким образом, чувствительность за счет применяемого подхода повысилась на 66%.

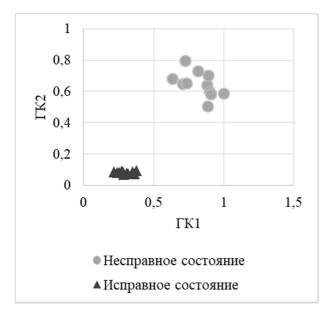


Рис. 8. Параметры исправного и неисправного дизеля в пространстве главных компонент

Предлагаемый подход обеспечил не только существенное повышение чувствительности, но также сокращение объёмов информации, необходимой для диагностики, и наглядное представление результатов диагностирования. Не требуется хранение сорока восьми сигналов, которые были изначально зарегистрированы. Достаточно вычислить и сохранить СКЗ сигналов вибрации и средние максимальные давления сжатия.

Заключение

В статье анализируются методы диагностирования ДД, каждый из которых по отдельности не может обеспечить чувствительность при выявлении дефектов на ранних стадиях развития. Предлагается подход, направленный на повышение чувствительности при диагностике ДД за счет совместной обработки данных различной физической природы с использова-

нием анализа сингулярного спектра. Описана схема обработки данных, обеспечивающая представление результатов в пространстве главных компонент.

Повышение чувствительности обосновывается путем численного моделирования и обработки результатов измерения диагностических параметров в реальных производственных условиях. В качестве показателей чувствительности рассматриваются расстояния между координатами центров кластеров параметров исправного и неисправного состояния в исходном пространстве и в пространстве главных компонент. Продемонстрировано, что предлагаемый подход обеспечивает повышение чувствительности в условиях, когда влияние дефекта на диагностические параметры сопоставимо с действием случайных факторов. Указанное повышение качества диагностирования достигается благодаря наличию корреляции между параметрами за счет их представления в виде траекторных матриц. Помимо повышения чувствительности при выявлении дефектов также достигается и существенное сокращение объемов обрабатываемой информации, которая используется для определения состояния. Преимуществом предлагаемого подхода также является наглядная визуализация результатов диагностирования.

Указанные преимущества, подтвержденные положительными результатами апробации, востребованы в сфере технической диагностики энергетического оборудования. Предлагаемый подход может быть использован при разработке систем диагностики ДД, используемых в различных отраслях.

Литература

- 1. Адаменков А.К., Веселова И.Н. Диагностика технического состояния электроприводной арматуры // Электрические станции. 2007. № 2. С. 53-56.
- 2. Комплексы «Дизель-Адмирал». URL: http://www.npkgarant.spb.ru/index.php/ct-menu-item-6/ct-menu-item-7 (дата обращения: 27.05.2017).
- 3. Комплексы централизованного контроля, диагностики и настройки технического состояния магистральных тепловозов КДН «Магистраль». URL: http://www.all-pribors.ru (дата обращения: 27.05.2017).
- 4. Свид. 2015612308 Российская Федерация. Программный комплекс управляющей системы машины перегрузочной / В.В. Коробкин, А.И. Серогодский, И.В. Блуишвили, А.А. Дубовик; заявитель и правообладатель «Южный федеральный университет» (RU). Опубл. 17.02.2015. 67 с.
- 5. Hong L., Dhupia J.S. A time domain approach to diagnose gearbox fault based on measured vibration signals. Journal of Sound and Vibration. 2014. Vol. 333. Is. 7. P. 2164–2180.

- 6. Analysis and processing of shaft angular velocity signals in rotating machinery for diagnostic applications / Y.W. Kim, G. Rizzoni, B. Samimy, Y.Y. Wang // International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-95, 1995. Vol. 5, Is. 9-12. P. 2971 2974.
- 7. Experimental investigation on the influence of titanium dioxide nanofluid on emission pattern of biodiesel in a diesel engine / D. Yuvarajan, M. Dinesh Babu, N. BeemKumar, P. Amith Kishore // Atmospheric Pollution Research. 2018. Vol. 9. Is. 1. P. 47–52. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2017.06.003.
- 8. Lei Y., He Z., and Zi Y. A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. Expert Systems with Applications, 2008. 35(4). P. 1593-1600.
- 9. Bugharbee Al. Hussein and Trendafilova, Irina. A Methodology for Fault Detection in Rolling Element Bearings

- Using Singular Spectrum Analysis// International Conference on Engineering Vibration 2017 (ICoEV 2017). Sofia, Bulgaria 2017. URL: https://strathprints.strath.ac.uk/62663/
- 10. Venkat Venkatasubramanian, Raghunathan Rengaswamy, Kewen Yin and other. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods // Computers and Chemical Engineering 27. 2003. P. 293-311.
- 11. Переносной программно-технический комплекс диагностирования дизель-генераторов [Электронный ресурс] / Е.А. Абидова, О.Ю. Пугачёва, А.Е. Дембицкий и др. // Безопасность ядерной энергетики: тез. докл. XIV Междунар. науч.-практ. конф. Волгодонск: [Б. и.], 2018. 1 электрон. опт. диск (CD).

Поступила 04.06.2021; принята к публикации 23.08.2021

Информация об авторах

Абидова Елена Александровна – канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ атомного энергетического машиностроения, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (347360, Россия, г. Волгодонск, ул. Ленина, 27), e-mail: e-abidova@mail.ru

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

Дембицкий Артем Евгеньевич – доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (347360, Россия, г. Волгодонск, ул. Ленина, 27), e-mail: aedembitskii@mephi.ru

Чернов Александр Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных и управляющих систем, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (347360, Россия, г. Волгодонск, ул. Ленина, 27), e-mail: vitikafius@mephi.ru

METHOD OF COMPREHENSIVE DATA ANALYSIS IN DIAGNOSTICS OF COMPLEX POWER EQUIPMENT

E.A. Abidova¹, A.D. Danilov², A.E. Dembitskiy¹, A.V. Chernov¹

¹Volgodonsk Engineering Technical Institute, the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Volgodonsk, Russia ²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article suggests an approach to the diagnosis of complex and oversized equipment by the example of determining the technical condition of a diesel engine. A distinctive feature of the diesel engine is the complexity of the design, which requires the use of a set of methods to ensure complete control and sensitivity when detecting defects at early stages of development. We describe the data processing scheme, which allows you to increase the sensitivity in diagnostics due to the complex analysis of data of various physical nature using the principal component method. The increase in sensitivity is justified by numerical modeling and processing the results of measuring diagnostic parameters in real production conditions. Distances between coordinates of centers of clusters of parameters of serviceable and faulty state in initial space and in space of principal components are considered as indicators of sensitivity. We demonstrated that the proposed approach provides increased sensitivity in conditions where the effect of a defect on diagnostic parameters is comparable to measurement errors. The indicated improvement in the quality of diagnostics is achieved due to the correlation between the parameters due to their representation in the form of trajectory matrices. In addition to increasing sensitivity when detecting defects, significant compression of information that is used to determine the state is also achieved. The advantage of the proposed approach is also the vivid visualization of the results

Key words: diagnostics of diesel-generators, vibration diagnostics, indicator pressure, complex analysis, method of principal components

References

- 1. Adamenkov A.K., Veselova I.N. "Diagnostics of the technical condition of electrically driven valves", *Electric Stations (Elektricheskie stantsii)*, 2007, no. 2, pp. 53-56.
- 2. Complexes "Diesel-Admiral", available at: http://www.npkgarant.spb.ru/index.php/ct-menu-item-6/ct-menu-item-7 (date of access: 05.27.2017).

- 3. Complexes of centralized control, diagnostics and adjustment of the technical condition of main diesel locomotives KDN "Magistral", available at: http://www.all-pribors.ru (date of access: 27.05.2017)
- 4. Korobkin V.V., Serogodskiy A.I., Bluishvili I.V., Dubovik A.A. "The software complex of the control system of the transshipment machine" ("Programmnyy kompleks upravlyayushchey sistemy mashiny peregruzochnoy"), patent RF no. 2015612308, 2015, 67 p.
- 5. Hong L., Dhupia J.S. "A time domain approach to diagnose gearbox fault based on measured vibration signals", *J. of Sound and Vibration*, 2014, vol. 333, issue 7, pp. 2164–2180.
- 6. Kim Y., Rizzoni G., Samimy B., Wang Y. "Analysis and processing of shaft angular velocity signals in rotating machinery for diagnostic applications", *IEEE Int. Conf. on Acoustic Speech and Signal Processing USA*, 1995, vol. 5, issue 9-12, pp. 2971-2974.
- 7. Yuvarajan D., Dinesh Babu M., BeemKumar N., Amith Kishore P. "Experimental investigation on the influence of titanium dioxide nanofluid on emission pattern of biodiesel in a diesel engine", *Atmospheric Pollution Research*, 2018, vol. 9, issue 1, pp. 47–52. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2017.06.003.
- 8. Lei Y., He Z., Zi Y. "A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery", *Expert Systems with Applications*, 2008, no. 35(4), pp. 1593-1600.
- 9. Al Bugharbee H., Trendafilova I. "A methodology for fault detection in rolling element bearings using singular spectrum analysis", *Int. Conf. on Engineering Vibration 2017 (ICoEV 2017)*, 4-7 September 2017, Sofia, Bulgaria, available at: https://strathprints.strath.ac.uk/62663/
- 10. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K. et al. "A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods", *Computers and Chemical Engineering* 27, 2003, pp. 293-311.
- 11. Abidova E.A., Pugacheva O.Yu., Dembitskiy A.E. et al. "Portable software and hardware complex for diagnosing diesel generators", Nuclear Power Safety: Abstracts of XIV Int. Scientific and Practical Conf. (Bezopasnost' yadernoy energetiki: tez. dokl. KHIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf), May 30 June 1, Volgodonsk, 2018.

Submitted 04.06.2021; revised 23.08.2021

Information about the authors

Elena A. Abidova, Cand. Sc. (Technical), research worker, Volgodonsk Engineering Technical Institute, the branch of National Research Nuclear University "MEPhI" (73/94 Lenin St., Volgodonsk 347360, Russia), e-mail: e-abidova@mail.ru, tel. +79286118544

Aleksandr D. Danilov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia) e-mail: danilov-ad@yandex.ru

Artyem E. Dembitskiy, Associate Professor, Volgodonsk Engineering Technical Institute, the branch of National Research Nuclear University "MEPhI" (73/94 Lenin St., Volgodonsk 347360, Russia), e-mail: aedembitskii@mephi. ru

Aleksandr V. Chernov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Volgodonsk Engineering Technical Institute, the branch of National Research Nuclear University "MEPhI" (73/94 Lenin St., Volgodonsk 347360, Russia), e-mail: vitikafius@mephi.ru

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.005 УДК 621.383.8

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ СОВМЕЩЕННЫХ РАЗНОДИАПАЗОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

А.Н. Ветров, А.Ю. Потлов

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

Аннотация: задача повышения качества результатов медицинской диагностики и удобства их интерпретации является актуальной на современном этапе развития биомедицинской инженерии. Особый интерес представляют методы визуализации, применимые при диагностике онкологических заболеваний. Повышать достоверность медицинской диагностики таких патологических состояний предлагается посредством совмещения разнодиапазонных изображений, в частности сканов в инфракрасном и видимом диапазонах длин волн. Предлагается методика, в которой два изображения конкретного биообъекта, полученные от датчиков, работающих в разных частотных диапазонах, имеющие одинаковые пространственные параметры и сформированные с общего ракурса, сводятся в общее изображение чересстрочно. Новизна предлагаемой методики заключается в том, что после совмещения изображений производится взаимная передача заданных частей каждого пикселя соседним пикселям по вертикали. В полученном изображении каждый пиксель содержит информацию оптического и инфракрасного изображений в заданных пропорциях. Показано, что предлагаемая методика обеспечивает увеличение информативности в полученном изображении в шесть раз относительно исходных изображений. Предлагаемая методика совмещения разнодиапазонных изображений может быть применена в различных прикладных областях

Ключевые слова: медицинская визуализация, медицинская диагностика, изображение, пиксель, информативность

Введение

Вероятность ошибки при постановке диагноза в значительной мере зависит от качества результатов медицинской визуализации. В первую очередь речь идет о пространственном разрешении и тканевом контрасте. Для снижения риска врачебной ошибки (неверной интерпретации уже имеющихся диагностических данных) часто используются дополнительные многократные сканирования исследуемой ткани или органа с использованием разнодиапазонных методов медицинской диагностики. Такой подход во много обоснован, т.к. из большего количества снимков можно получить больше полезной информации. Однако весь потенциал полученных диагностических данных все же не используется в полном объеме ввиду сложности анализа многомерных разноформатных массивов данных. К тому же сбор и интерпретация излишних данных финансово затратны и, что не менее важно, отнимает время, которое при лечении подавляющего большинства заболеваний является критически важным фактором.

Совмещение изображений позволяет упростить и ускорить процесс диагностики и интерпретации результатов медицинской визуализации. Такой подход обеспечивает разум-

ный баланс между объемом диагностических данных, временными и финансовыми затратами на их сбор, а также простотой и удобством их анализа. Среди вариантов совмещения разнодиапазонных медицинских изображений следует отметить комплексирование тепловизионного и оптического изображений [1], поскольку от таких датчиков формируется наиболее достоверная информация об онкологических заболеваниях кожного и приповерхностного типа [2].

Идея совмещения изображений от разнодиапазонных датчиков уже находит разноплановую реализацию. Например, известен «Способ дистанционного обследования объектов электрических сетей с помощью тепловидеосъемочного устройства» [3]. В приведённом способе применяется обычное наложение двух изображений — инфракрасного и оптического, снятых в одном масштабе и с общего ракурса. Недостаток — в результирующем изображении теряются важные детали в оптическом изображении за счёт их перекрытия сегментами инфракрасного изображения, соответствующими наиболее нагретым участкам исследуемого биообъекта.

Существует также метод, в котором использован принцип простого суммирования значений яркости пикселей разнородных изображений - «Способ формирования матричного изображения» [4]. Но этот способ применим

-

только для чёрно-белых изображений. Недостаток — теряется температурная информация об объектах, т.е. анализ количественных показателей тепловых режимов инфракрасного изображения исключён.

Известен способ «Комплексирование цифровых полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений» [5]. Но здесь необходимо предварительное преобразование аналоговых сигналов изображений, снимаемых непосредственно с датчиков, в цифровую форму.

Далее организуется комплексирование изображений путём суммирования каждых соответствующих своему положению пикселей по яркости с дальнейшей нормализацией результирующего изображения по яркостному диапазону. Помимо определённых издержек в виде необходимых аппаратурных затрат, этот способ содержит существенный недостаток в том, что сформированное изображение содержит информацию с преобладанием либо теплового изображения, либо оптического. При этом существенно информативность конечного изображения не увеличивается.

Проведённый анализ показал, что в большинстве случаев совмещение изображений сводится к упорядоченной расстановке разнородных пикселей в объединённом изображении в заданном порядке - «Способ совмещения изображений, полученных с помощью различных фотодатчиков» [6].

В этом способе присутствует тот же недостаток, что и в приведённом выше. Более того, информативность результирующего изображения не повышается

Постановка задачи

На основе приведённых примеров совмещения разнодиапазонных изображений можно сделать вывод, что после совмещения изображений необходимо произвести определённую обработку полученного массива с целью придания каждому пикселю информации о соседних прилежащих пикселях.

Цель – существенное повышение информативности полученного изображения.

Материал и метод исследования

В настоящей работе предлагается методика обработки предварительно совмещённых разнодиапазонных изображений [7,8] с целью существенного повышения информативности.

Суть методики сводится к взаимному внедрению определённой части каждого пикселя в соседний пиксель другого диапазона. Процедура сводится к следующему.

Изначально имеем два массива разнородных изображений с одинаковыми пространственными параметрами по границам и количеству пикселей в каждом изображении. Далее построчно формируется единое изображение, причём предусмотрено чередование строк оптического (телевизионного - ТВ) и теплового (инфракрасного – ИК) (рис. 1). Обозначим: n_k количество пикселей ИК изображения, n_t количество пикселей ТВ изображения, $2n_{kt}$ – количество пикселей общего изображения.

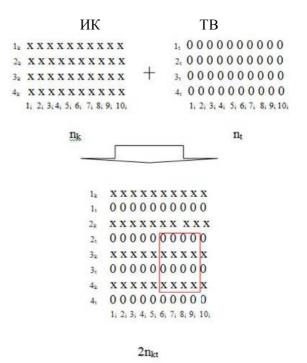


Рис. 1. Принцип формирования совмещённого изображения

Зададим определённые величины - в объединённом изображении расположенные напротив в соседних строках п-е пиксели содержат конкретные количественные значения: Q_i^t - для ТВ и Q_k^t - для ИК изображений. После показанного совмещения вводится процедура передачи определённых частей каждого пикселя соседним пикселям по противоположным строкам. Каждый пиксель делится по следующим долям: 1/2, 1/4, 1/4. Оптимальность деления пикселей в показанных коэффициентах задавалась требованием по максимальной яркости полученного изображения. Процедура определения полученных коэффициентов деления пикселей сводилась к перебору различных

значений этих коэффициентов с шагом 0,01 от 0 до 0,49 при условии, что два коэффициента должны быть равны, а сумма трёх коэффициентов каждого пикселя равна единице.

Процедура итерации по определению яркости всего изображения Q, с количеством пикселей N сводилась к следующему [9, 10]:

$$Q_p = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^{N} R_p + G_p + B_p.$$

В результате чего получена следующая графическая зависимость значений суммарной яркости при различных коэффициентах (рис. 2).

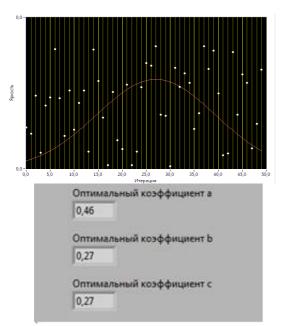


Рис. 2. График определения максимальной яркости совмещенных изображений

Таким образом, пиксели видео и теплового изображения состоят из следующих частей:

$$Q_{i}^{t} = \frac{Q_{i}^{t}}{2} + \frac{Q_{i}^{t}}{4} + \frac{Q_{i}^{t}}{4}, Q_{k}^{t} = \frac{Q_{k}^{t}}{2} + \frac{Q_{k}^{t}}{4} + \frac{Q_{k}^{t}}{4}.$$

Отсюда графическая модель предлагаемой методики смешивания двух разнодиапазонных изображений сводится к следующему (рис. 3).

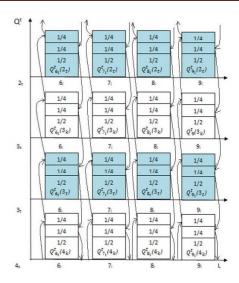


Рис. 3. Графическая модель исходного состояния

Математическая модель примет следующий вид:

$$\begin{split} Q_i^{t+1} &= \frac{Q_i^{t+1}}{2} + \frac{Q_k^{t+1}}{4} + \frac{Q_{k-1}^{t+1}}{4}, \\ Q_k^{t+1} &= \frac{Q_k^{t+1}}{2} + \frac{Q_i^{t+1}}{4} + \frac{Q_{k-1}^{t+1}}{4}, \\ Q_{i-1}^{t+1} &= \frac{Q_{i-1}^{t+1}}{2} + \frac{Q_{k-1}^{t+1}}{4} + \frac{Q_{k-2}^{t+1}}{4}, \\ Q_{k-1}^{t+1} &= \frac{Q_{k-1}^{t+1}}{2} + \frac{Q_i^{t+1}}{4} + \frac{Q_{i-1}^{t+1}}{4}, \\ Q_{i+1}^{t+1} &= \frac{Q_{i+1}^{t+1}}{2} + \frac{Q_{k-1}^{t+1}}{4} + \frac{Q_{k+1}^{t+1}}{4}, \\ Q_{k+1}^{t+1} &= \frac{Q_{k+1}^{t+1}}{2} + \frac{Q_{i+1}^{t+1}}{4} + \frac{Q_{i+1}^{t+1}}{4}, \end{split}$$

где Q_*^{t+1} - состояние n-го пикселя в результате процедуры обмена.

Результирующая графическая модель после передачи заданных частей каждого пикселя примет следующий вид (рис. 4).

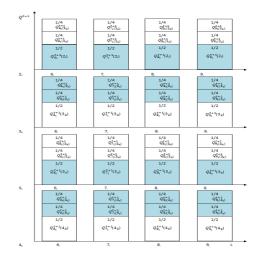


Рис. 4. Итоговое значение пикселей

Для практической реализации предлагаемой методики была применена компьютерная обработка ТВ и ИК изображений общего изображения, что показано на рис. 5.

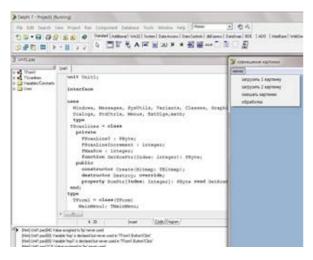


Рис. 5. Реализация программой Delphi-7

Результат исследований

Для практической реализации предлагаемой методики были сформированы два разнодиапазонных изображения одного объекта в инфракрасном (ИК) и оптическом (ТВ) (рис. 6) и (рис. 7) соответственно.



Рис. 6. Первоначальное ИК изображение

Следует отметить, что ИК изображение не детализирует объект съёмки, а только показывает распределение температуры по поверхности объекта. Детализация реализуется только на оптическом изображении.



Рис. 7. Первоначальное ТВ изображение

Оба эти изображения сводились в одно общее изображение путём чередования строк инфракрасного и оптического диапазонов (рис. 8).

Следствием этой процедуры явилось то, что обобщённое изображение увеличилось по вертикали в два раза. Сформированное изображение стало содержать информацию об инфракрасном диапазоне и оптическом диапазоне рассматриваемого объекта.

Информативность полученного изображения увеличена в два раза относительно исходных изображений.



Рис. 8. Результат процедуры чересстрочного объединения исходных изображений

Далее организуется передача частей каждого пикселя по вертикали. Результат после перемещения заданных частей каждого пикселя по вертикали показан на рис. 9.



Рис. 9. Результирующее изображение после перемешивания частей соседних пикселей

Для того, чтобы определить полученную информативность [11] при реализации предлагаемой методики воспользуемся следующими рассуждениями.

ТВ и ИК изображения содержат одинаковое количество пикселей m.

$$m = m_i = m_t$$
,

где m_i – число пикселей ИК изображения, m_t – число пикселей ТВ изображения.

Пусть h — информативность исходного пикселя. Предлагаемая методика совмещения основана на поочередном суммировании строк ИК и ТВ изображений. Таким образом, число пикселей M_c в совмещенном изображении можно вычислить как сумму числа пикселей ИК и ТВ изображений:

$$M_c = m_i + m_t = 2 \cdot m$$
,

где M_c — количество пикселей в объединённом изображении. Тогда обобщённая информативность будет:

$$H_c = 2 \cdot m \cdot h$$
.

Объединённое изображение имеет в два раза больше пикселей по отношению к исходным изображениям. Можно сделать вывод, что на данном этапе совмещения по предлагаемому способу информативность относительно исходного ТВ или ИК изображения повысилась в 2 раза. В разработанной методике после поочередной записи строк в результирующее изображение организуется разделение значений пикселей на предусмотренные доли. Далее организуется перемещение (внедрение) двух четвертных долей всех пикселей по одной в соседние пиксели по вертикали. За счёт этого каждый пиксель полученного изображения хранит информацию как о ТВ изображении, так и об ИК изображении. Причём один пиксель будет состоять из двух частей ИК пикселя и одной части ТВ, а другой пиксель из двух частей ТВ пикселя и одной части ИК пикселя.

То есть каждый пиксель совмещенного изображения несет в себе в три раза больше информации относительно исходного. Если h – информативность исходного пикселя, тогда 3h – информативность пикселя совмещенного изображения.

Если $H_i = m_i \cdot h$ – информативность исходного ИК изображения; $H_t = m_t \cdot h$ – информативность исходного ТВ изображения, то информативность совмещенного изображения:

$$\begin{aligned} H_c^* &= m_i \cdot 3 \cdot h + m_t \cdot 3 \cdot h = 3 \cdot h \cdot \\ (m_i + m_t) &= 3 \cdot h \cdot 2 \cdot m = 6 \cdot m \cdot h. \end{aligned}$$

Рассчитаем относительную эффективность η предлагаемой методики, принимая за меру информативность исходного изображения H_c :

$$\eta = \frac{H_c^*}{H_c} = \frac{6 \cdot m \cdot h}{m \cdot h} = 6.$$

Таким образом, разработанная и предложенная методика совмещения и обработки разнодиапазонных изображений позволяет увеличить информативность итогового изображения по отношению к исходным изображениям в шесть раз.

Выводы

Разработана методика совмещения и обработки разнодиапазонных изображений с целью повышения информативности при медицинской диагностике онкологических заболеваний приповерхностного характера. Определены пропорции оптимального деления пикселей обоих исходных изображений по критерию максимальной яркости. Показано, что информативность полученного изображения превышает каждое из исходных изображений в шесть раз.

Литература

- 1. Многофункциональное использование матричных приборов с зарядовой связью в системе поиска пострадавших / А.Н. Ветров, И.Ю. Артюхин, В.Ю. Ошурков, М.А. Гахзар // Вестник ТГТУ. 2013. № 2. С. 298-302.
- 2. Шушарин А.Г., Морозов В.В., Половинка М.П. Медицинское тепловидение современные возможности метода // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 4. С. 241-251.
- 3. Пат.2258204 Российская Федерация. Способ дистанционного обследования объектов электрических сетей с помощью тепловидеосъемочного устройства / Кузнецов А.Е., Калюжный В.И., Ковалев А.О., Ефремов И.Ф., Гектин Ю.М.; заявитель и патентообладатель ЗАО "Центр перспективных наукоемких технологий" (RU). № 2258204. 2004; заявл. 16.02.2004; опубл. 10.08.2005; Бюл. № 22.
- 4. Пат. 2004 120046 Российская Федерация. Способ формирования матричного объекта / Бендицкий А.А.; заявитель и патентообладатель Бедницкий А.А. №

2305320.2006; заявл. 02.06.2004.; опубл. 10.01.2006 Бюл. № 1.

- 5. Пат. 2451338 Российская Федерация. Способ комплексирования цифровых полутоновых телевизионных и тепловизионных изображений / Богданов А.П., Костяшкин Л.Н., Морозов А.В., Павлов О.В., Романов Ю.Н., Рязанов А.В.; заявитель и патентообладатель открытое акционерное общество «Государственный рязанский приборный завод». № 2451338.2010; заявл. 23.12.2010; опубл. 20.05.2012. Бюл. № 14.
- 6. Пат. 2007 145889 Российская Федерация. Способ совмещения изображений, полученных от различных фотодатчиков и устройство для его реализации / Ерош И.Л., Сергеев М.Б., Соловьев Н.В., Филатов Г.П., Козлов А.А., Литвинов М.Ю.; заявитель и патентообладатель государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (RU). № 2435221.2007; заявл. 10.12.2007; опубл. 20.06.2009. Бюл. № 17.
- 7. Елесина С.И., Ломтева О.А. Исследование алгоритмов корреляционного совмещения изображений в системах комбинированного видения // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 71-76.
- 8. Елесина С.И. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах. М.: Радиотехника, 2015. 208 с.
- 9. Новиков, А.И., Саблина В.А., Ефимов А.И. Совмещение изображений в системах технического зрения методами проективной геометрии // Техническое зрение в системах управления 2015: науч.-техн. конф. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 51.
- 10. The Contour Analysis and Image-Superimposition Problem in Computer Vision Systems / A.I. Novikov, V.A. Sablina, M.B Nikiforov, et. al. // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. № 1(25). P. 73-80.
- 11. Брянский С.А., Визильтер Ю.В. Условные морфологические меры сложности и информативности изображений // Математические методы распознавания образов. 2017. Т. 18. № 1. С. 110-111.

Поступила 24.05.2021; принята к публикации 23.08.2021

Информация об авторах

Ветров Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника», Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106), e-mail: avetrov@yandex.ru Потлов Антон Юрьевич - канд. техн. наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника», Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106), e-mail: zerner@yandex.ru

IMPROVEMENT OF INFORMATIVITY OF COMBINED DIFFERENT-RANGE IMAGES IN MEDICAL DIAGNOSTICS

A.N. Vetrov, A.Yu. Potlov

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract: in the medical diagnostics of diseases, it is necessary to obtain the most reliable information in order to obtain the correct diagnosis and, as a result, the correct treatment for the patient. One of the methods of diagnostic studies of oncological diseases of a near-surface nature is to obtain infrared images. It is possible to increase the reliability of information by combining images obtained from thermal imagers, as well as from television video cameras. In this paper, we propose a technique in which two images of a particular object obtained from sensors operating in different frequency ranges, having the same spatial parameters, and formed from the same angle, are interlaced into a common image. The novelty of the proposed method lies in the fact that after combining the images, the specified parts of each pixel are mutually transmitted to the neigh-

boring pixels vertically. In the resulting image, each pixel contains information of optical and infrared images in appropriate proportions. It is shown that the proposed method provides an increase in information content in the resulting image six times relative to the original image. The proposed technique for combining multi-range images can be applied in various areas

Key words: medical imaging, medical diagnostics, image, pixel, information content

References

- 1. Vetrov A.N., Artyukhin I.Yu., Oshurkov V.Yu., Gakhzar M.A. "Multifunctional use of charge-coupled matrix devices in the victim search system", *Bulletin of TSTU (Vestnik TGTU)*, 2013, no. 2, pp. 298-302.
- 2. Shusharin A.G., Morozov V.V., Polovinka M.P. "Medical thermal imaging modern possibilities of the method", *Modern Problems of Science and Education (Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya)*, 2011, no. 4, pp. 241-251.
- 3. Kuznetsov A.E., Kalyuzhnyy V.I., Kovalev A.O., Efremov I.F., Gektin Yu.M. "A method for remote inspection of electrical network objects using a thermal imaging device" ("Sposob distantsionnogo obsledovaniya ob"ektov elektricheskikh setey s pomoshch'yu teplovideos"emochnogo ustroystva"), patent 2258204 Russian Federation, 2004, publ. 10.08.2005, bul. 22.
- 4. Benditskiy A.A. "A method of forming a matrix object" ("Sposob formirovaniya matrichnogo ob"ekta"), patent 2004 120046 Russian Federation, publ. 10.01.2006 bul. 1.
- 5. Bogdanov A.P., Kostyashkin L.N., Morozov A.V., Pavlov O.V., Romanov Yu.N., Ryazanov A.V. "A method for integrating digital halftone television and thermal imaging images" ("Sposob kompleksirovaniya tsifrovykh polutonovykh televizionnykh i teplovizionnykh izobrazheniy"), patent 2451338 Russian Federation, publ. 20.05.2012, bul. 14.
- 6. Erosh I.L., Sergeev M.B., Solov ev N.V., Filatov G.P., Kozlov A.A., Litvinov M.Yu. "A method of combining images obtained from various photosensors and a device for its implementation" ("Sposob sovmeshcheniya izobrazheniy, poluchennykh ot razlichnykh fotodatchikov i ustroystvo dlya ego realizatsii"), patent 2007 145889 Russian Federation, publ. 20.06.2009, bul. 17
- 7. Elesina S.I., Lomteva O.A. "Investigation of algorithms for correlative superposition of images in combined vision systems", *Digital Signal Processing (Tsifrovaya obrabotka signalov)*, 2015, no. 3, pp. 71-76.
- 8. Elesina S.I. "Alignment of images in correlation-extreme navigation systems" ("Sovmeshchenie izobrazheniy v korrelyatsionno-ekstremal'nykh navigatsionnykh sistemakh"), Moscow, Radiotekhnika, 2015, 208 p.
- 9. Novikov A.I., Sablina V.A., Efimov A.I. "Combining images in technical vision systems using projective geometry methods", *Scientific and Technical. Conf.: Technical Vision in Control Systems 2015 (Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya 2015)*, Moscow, IKI RAN, 2015, pp. 51.
- 10. Novikov A.I., Sablina V.A., Nikiforov M.B et al. "The contour analysis and image-superimposition problem in computer vision systems", *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2015, no. 1 (25), pp. 73-80.
- 11. Bryanskiy S.A., Vizilter Yu.V. "Conditional morphological measures of complexity and information content of images", *Mathematical Methods of Pattern Recognition (Matematicheskie metody raspoznavaniya obrazov)*, 2017, vol. 18, no. 1, pp. 110-111.

Submitted 24.05.2021; revised 23.08.2021

Information about the authors

Aleksandr N. Vetrov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya st., Tambov 392000, Russia), e-mail: avetrov@yandex.ru

Anton Yu. Potlov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya st., Tambov 392000, Russia), e-mail: zerner@yandex.ru

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.006 УДК 681.5.01

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В РЕЖИМЕ СЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ С ПОМОШЬЮ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Д.А. Смирнов¹, В.Г. Бондарев², А.В. Тепловодский¹, А.В. Николенко^{2,3}

¹Государственный лётно-испытательный центр Министерства обороны имени В.П. Чкалова, г. Ахтубинск, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия ³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлено обоснование использования оптико-электронной системы в качестве навигационноизмерительного комплекса. Проведен краткий анализ существующих систем навигации, применимых для беспилотного летательного аппарата, и предложен алгоритм обеспечения системы видеонаблюдения в режиме счисления координат с помощью системы технического зрения. Задачу счисления координат БЛА с использованием видеопоследовательностей изображений земной поверхности можно решить с высокой точностью с помощью бинокулярной СТЗ. Однако в случае выхода из строя одной из камер определение координат местоположения будет продолжаться с достаточной точностью для решения поставленной задачи. А недостаток измерительных средств обеспечивается за счет использования 6 особых точек земной поверхности. Поэтому предложен алгоритм определения местоположения с помощью монокулярной системы технического зрения. Для решения задачи определения местоположения выделяются и определяются координаты особых точек на изображении поверхности. Для нахождения особых точек была выполнена обработка оцифрованного изображения методом FAST-9. Так как изображение получается цветным, то процедура нахождения особых точек является надежным путем применения метода FAST-9 для двух или даже трех цветовых компонент. Данная процедура позволяет достигнуть высокой точности определения счисляемых координат БЛА. Для решения задач счисления координат предпочтительно использование методов простых итераций, Брауна или Ньютона

Ключевые слова: счисление координат, монокулярная система технического зрения, определение местоположения, беспилотный летательный аппарат

Введение

В настоящее время в мире активизируется разработка беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Если на ранних этапах на БЛА все задачи управления решались человеком (оператором управления), то все больше специалистов в этой сфере ведут разработки по автоматизации функций управления движения. Традиционно для решения этих задач используют радиотехнические системы (РТС), спутниковые навигационных системы (СНС), инерциальнонавигационные системы (ИНС), которые имеют различные погрешности и могут быть подавлены путем постановки помех [1]. В этих условиях система технического зрения (СТЗ) отличается высокой информативностью и точностью. Необходимо отметить, что внедрение СТЗ на борт БЛА позволит решать целый ряд задач, связанных с навигацией, распознаванием, наведением, осуществлением посадки с высокой

точностью, движением БЛА в окрестности аэродрома и т.д. [2].

Однако для реализации СТЗ, а именно обработки видеоинформации, требуются высокие вычислительные ресурсы, поэтому по мере развития вычислителей увеличивается применение СТЗ. В частности, СТЗ используется для измерения параметров движения БЛА относительно поверхностей и наблюдаемых поверхностей [3]. К таким задачам относятся автоматическая посадка БЛА на оборудованную ВПП, неподготовленную площадку и на подвижную поверхность такую, как палуба корабля. Кроме того, СТЗ может применяться для корректирования ошибок от ИНС, РТС.

СТЗ является перспективным средством развития для решения задач управления в режиме реального времени на БЛА. Работы по созданию СТЗ широко ведутся как в Российской Федерации, так и за рубежом, а развитие теории тесно сочетается с инновационной деятельностью. Развитие СТЗ находит свое отражение при создании высокоточных систем наведения БЛА, решении задачи навигации [4].

© Смирнов Д.А., Бондарев В.Г., Тепловодский А.В., Николенко А.В., 2021

Актуальность

Основным средством навигации у БЛА для определения текущих координат местоположения является ИНС и СНС [5]. Данные системы дают возможность удержать БЛА на заданной траектории полета. Однако данные системы имеют следующие недостатки:

- ИНС имеют высокую стоимость, большую массу, а также нарастающую во времени погрешность;
- СНС сильно зависят от помеховой обстановки.

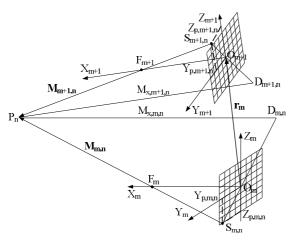
В связи с вышесказанным видно, что разработка средств навигации является актуальной задачей.

Развитие оптико-электронных систем (ОЭС) повлекло за собой и изменение в системе навигации, решение таких задач стало возможно с помощью видеопоследовательностей [6].

Задача счисления координат БЛА с использованием видеопоследовательностей изображений земной поверхности можно решить с высокой точностью с помощью бинокулярной СТЗ. В случае выхода из строя одной из камер определение координат местоположения будет продолжаться с достаточной точностью для решения поставленной задачи [7]. А недостаток измерительных средств обеспечивается за счет использования 6 особых точек земной поверхности.

Постановка и решение задачи

Чтобы вычислить смещение подвижного объекта, необходимо выделить и определить координаты особых точек на изображении поверхности. На рисунке представлена СТЗ в процессе определения одной из шести точек.



Представление СТЗ в процессе определения одной из шести особых точек

Пусть система координат (СК) $O_m X_m Y_m Z_m$ связана с первым положением БЛА, а СК $O_{m+1} X_{m+1} Y_{m+1} Z_{m+1}$ связана со вторым. Оптическая ось объектива совпадает с осью $O_m X_m$.

Обозначим буквой P особую точку земной поверхности. Геометрический центр объектива находится в точке F_m , в котором формируется оптическое изображение $S_{m,n}$ ($S_{m+1,n}$). Из двух последовательных положений подвижного объекта воспроизводится изображение поверхности [8].

Для нахождения особых точек необходимо произвести обработку оцифрованного изображения методом FAST-9. Такой метод производит быструю проверку сегментов сравнивая яркость точек окружности радиуса 3 пикселя с яркостью точки, лежащей в центре. Когда яркость N=9 точек окружности меньше либо больше яркости ее центра, то центр такой окружности считается особой точкой. Так как изображение получается цветным, то процедура нахождения особых точек становится надежным путем применения метода FAST-9 для двух или даже трех цветовых компонент, конечно, нужно видеть и очевидные затраты такого усовершенствования.

Следует отметить очевидный факт, что работа с координатами пикселя в интересах задач навигации или измерения не обещает достижения приемлемой точности [9]. Поэтому необходимо усилить описанный метод путем применения процедуры нахождения центра яркости круга, выделенного методом FAST-9, что приводит нас к субпиксельности. Такое усовершенствование не является единственным, но как показывает практика, погрешности снижаются кратно.

Определим координаты изображений особой точки на фотоматрице. Положение СК $O_{m+1}X_{m+1}Y_{m+1}Z_{m+1}$ относительно системы $O_mX_mY_mZ_m$ зададим вектором смещения начала координат $r_{o,m}$, обусловленного движением подвижного объекта, а изменение углового положения системы $O_{m+1}X_{m+1}Y_{m+1}Z_{m+1}$ — матрицей направляющих косинусов (A_m) .

Выразим вектор $\overline{O_m P_n}$ двумя способами и приравняем его к правой части

$$\overline{O_{m}P_{n}} = \overline{r_{o,m}} + \overline{O_{m+1}S_{m+1,n}} +
+ \overline{M_{m+1,n}} = \overline{O_{m}S_{m,n}} + \overline{M_{m,n}}.$$
(1)

Вектора $\overline{M}_{m,n}$ и $\overline{M}_{m+1,n}$ выражаются посредством следующих соотношений, которые

вытекают из подобия пар треугольников $O_m S_m F_m \ S_m P_n D_m$ и $O_{m+1} S_{m+1} F_{m+1} \ S_{m+1} P_n D_{m+1}$

$$\overline{M}_{m,n} = (\overline{i}_m F - \overline{j}_m y_{p,m,n} - \overline{k}_m z_{p,m,n}) \frac{M_{x,m,n}}{F}, \quad (2)$$

$$\overline{M}_{m+1,n} = (\overline{i}_{m+1}F - \overline{j}_{m+1}y_{p,m+1,n} - \overline{k}_{m+1}z_{p,m+1,n}) - \overline{k}_{m+1}z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F},$$
(3)

$$\overline{O_m S}_{m,n} = \overline{j}_m y_{p,m,n} + \overline{k}_m z_{p,m,n}, \qquad (4)$$

$$\overline{O_{m+1}S}_{m+1,n} = \overline{j}_{m+1}y_{p,m+1,n} + \overline{k}_{m+1}z_{p,m+1,n},$$
 (5)

где $M_{x,m,n}$ и $M_{x,m+1,n}$ — проекции векторов $\overline{M}_{m,n}$ и $\overline{M}_{m+1,n}$ на оси $O_m X_m$ и $O_{m+1} X_{m+1}$; $y_{p,m,n}$, $z_{p,m,n}$, $y_{p,m+1,n}$, $z_{p,m+1,n}$ — координаты изображения особой точки P_n на фотоматрице, измеренные в двух положениях БЛА; \overline{i}_m , \overline{j}_m , \overline{k}_m и \overline{i}_{m+1} , \overline{j}_{m+1} , \overline{k}_{m+1} единичные орты в СК $O_m X_m Y_m Z_m$ и $O_{m+1} X_{m+1} Y_{m+1} Z_{m+1}$; $F = OF = O_1 F_1$ — фокусное расстояние объектива.

Переписывается векторное равенство (1) с учетом полученных выражений

$$\frac{\bar{r}_{o,m} + \bar{j}_{m+1} y_{p,m+1,n} + \bar{k}_{m+1} z_{p,m+1,n} +}{\bar{i}_{m+1} F - \bar{j}_{m+1} y_{p,m+1,n} - \bar{k}_{m+1} z_{p,m+1,n}} M_{x,m+1,n} = F$$

$$= \bar{j}_{m} y_{p,m,n} + \bar{k}_{m} z_{p,m,n} + F$$

$$+ \frac{\bar{i}_{m} F - \bar{j}_{m} y_{p,m,n} - \bar{k}_{m} z_{p,m,n}}{F} M_{x,m,n}.$$
(6)

Единичные орты $\bar{i}_m, \bar{j}_m, \bar{k}_m$ и $\bar{i}_{m+1}, \bar{j}_{m+1}, \bar{k}_{m+1}$ связаны между собой известным соотношением

$$\begin{bmatrix}
\bar{i}_{m+1} = \alpha_{11,m} \bar{i}_m + \alpha_{12,m} \bar{j}_m + \alpha_{13,m} \bar{k}_m \\
\bar{j}_{m+1} = \alpha_{21,m} \bar{i}_m + \alpha_{22,m} \bar{j}_m + \alpha_{23,m} \bar{k}_m \\
\bar{k}_{m+1} = \alpha_{31,m} \bar{i}_m + \alpha_{32,m} \bar{j}_m + \alpha_{33,m} \bar{k}_m
\end{bmatrix}, (7)$$

где $\alpha_{ij,m}$ — элементы матрицы направляющих косинусов $\left(A_m\right), i-1...3, j-1...3$.

$$\begin{pmatrix}
\cos \beta_m \cos \varphi_m & \sin \varphi_m & -\sin \beta_m \cos \varphi_m \\
\sin \beta_m \sin \gamma_m - \sin \varphi_m \cos \beta_m \cos \gamma_m & \cos \gamma_m \cos \varphi_m & \cos \beta_m \sin \gamma_m + \sin \beta_m \sin \varphi_m \cos \gamma_m \\
\sin \beta_m \cos \gamma_m + \cos \beta_m \sin \gamma_m & -\cos \varphi_m \sin \gamma_m & \cos \beta_m \cos \gamma_m - \sin \beta_m \sin \varphi_m \sin \gamma_m
\end{pmatrix}, (8)$$

где γ_m , β_m , φ_m — углы последовательных разворотов подвижного объекта вокруг осей $O_m X_m$, $O_m Y_m$, $O_m Z_m$, соответственно.

Подставляя выражения для ортов (7) в векторное соотношение (6) и проецируя на $O_m X_m$, $O_m Y_m$, $O_m Z_m$, получаем

$$\bar{r}_{o,m} + (\alpha_{21,m}\bar{i}_{m} + \alpha_{22,m}\bar{j}_{m} + \alpha_{23,m}\bar{k}_{m})y_{p,m+1,n} + (\alpha_{31,m}\bar{i}_{m} + \alpha_{32,m}\bar{j}_{m} + \alpha_{33,m}\bar{k}_{m})z_{p,m+1,n} + \\
+ [(\alpha_{11,m}\bar{i}_{m} + \alpha_{12,m}\bar{j}_{m} + \alpha_{13,m}\bar{k}_{m})F - (\alpha_{21,m}\bar{i}_{m} + \alpha_{22,m}\bar{j}_{m} + \alpha_{23,m}\bar{k}_{m})y_{p,m+1,n} - \\
- (\alpha_{31,m}\bar{i}_{m} + \alpha_{32,m}\bar{j}_{m} + \alpha_{33,m}\bar{k}_{m})z_{p,m+1,n}] \frac{M_{x,m+1,n}}{F} = \\
= \bar{j}_{m}y_{p,m,n} + \bar{k}_{m}z_{p,m,n} + (\bar{i}_{m}F - \bar{j}_{m}y_{p,m,n} - \bar{k}_{m}z_{p,m,n}) \frac{M_{x,m,n}}{F}.$$
(9)

$$x_{o,m} + \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{11,m} F - \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F} = M_{x,m,n}$$

$$y_{o,m} + \alpha_{22,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{32,m} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{12,m} F - \alpha_{22,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{32,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F} =$$

$$= y_{p,m,n} (1 - \frac{M_{x,m,n}}{F})$$

$$M$$

$$(10)$$

$$\begin{split} z_{o,m} + \alpha_{23,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{33,m} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{13,m} F - \alpha_{23,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{33,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F} &= \\ &= z_{p,m,n} (1 - \frac{M_{x,m,n}}{F}) \end{split}$$

где $x_{o,m}, y_{o,m}, z_{o,m}$ — координаты вектора $r_{o,m}$.

Величины $M_{x,m,n}$, $M_{x,m+1,n}$ являются промежуточными, поэтому не требуется их нахож-

дения, полученная система уравнений (10) упрощается. Выразим $M_{x,m,\mathbf{n}}$ из первого урав-

нения и подставим во второе и третье уравнения, получим

$$y_{o,m} + \alpha_{22,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{32,m} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{12,m} F - \alpha_{22,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{32,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F} = y_{p,m,n} - \frac{y_{p,m,n}}{F} [x_{o,m} + \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{11,m} F - \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F}]$$

$$(11)$$

$$z_{o,m} + \alpha_{23,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{33,m} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{13,m} F - \alpha_{23,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{33,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F} = z_{p,m,n} - \frac{z_{p,m,n}}{F} [x_{o,m} + \alpha_{21,m+1} y_{p,m+1,n} + \alpha_{31,m+1} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{11,m} F - \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F}].$$

$$(12)$$

Из полученных уравнений выразим отношение $\frac{M_{x,m+1,n}}{F}$ и приравняем друг другу. В процессе упрощения уравнений используем также следующие обозначения: $\chi_{y,m,n} = \frac{y_{p,m,n}}{F}$,

$$\chi_{y,m+1,n} = \frac{y_{p,m+1,n}}{F}, \quad \chi_{z,m,n} = \frac{z_{p,m,n}}{F}, \quad \chi_{z,m+1,n} = \frac{z_{p,m+1,n}}{F},$$

$$\beta_{x,m} = \frac{x_{o,m}}{F}, \quad \beta_{y,m} = \frac{y_{o,m}}{F}, \quad \beta_{z,m} = \frac{z_{o,m}}{F}.$$

$$y_{o,m} + \alpha_{22,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{32,m} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{12,m} F - \alpha_{22,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{32,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F} = y_{p,m,n} - \frac{1}{F} \left[x_{o,m} + \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{11,m} F - \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F} \right] \times (13)$$

$$\times \frac{y_{o,m} + \alpha_{22,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{32,m} z_{p,m+1,n} - y_{p,m,n} + \chi_{y,m,n} (x_{o,m} + \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n})}{\chi_{y,m,n} (\alpha_{11,m} F - \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n}) + (\alpha_{12,m} F - \alpha_{22,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{32,m} z_{p,m+1,n})} = -\frac{M_{x,m+1,n}}{F}$$

$$z_{o,m} + \alpha_{23,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{33,m} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{13,m} F - \alpha_{23,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{33,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F} = z_{p,m,n} - \frac{1}{F}$$

$$-\chi_{z,m,n} [x_{o,m} + \alpha_{21,m+1} y_{p,m+1,n} + \alpha_{31,m+1} z_{p,m+1,n} + (\alpha_{11,m} F - \alpha_{21,m} y_{p,m+1,n} - \alpha_{31,m} z_{p,m+1,n}) \frac{M_{x,m+1,n}}{F}] \times (14)$$

$$\times \frac{z_{o,m} + \alpha_{23,m} y_{p,m+1,n} + \alpha_{33,m} z_{p,m+1,n} - z_{p,m,n} + \chi_{z,m,n} (x_{o,m} + \alpha_{21,m+1} y_{p,m+1,n} + \alpha_{31,m+1} z_{p,m+1,n})}{F} = -\frac{M_{x,m+1,n}}{F}.$$

Получим

$$\frac{\beta_{y,m} + \alpha_{22,m} \chi_{y,m+1,n} + \alpha_{32,m} \chi_{z,m+1,n} + \chi_{y,m,n} (\beta_{x,m} + \alpha_{21,m} \chi_{y,m+1,n} + \alpha_{31,m} \chi_{z,m+1,n} - 1)}{\chi_{y,m,n} (\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m} \chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m} \chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{12,m} - \alpha_{22,m} \chi_{y,m+1,n} - \alpha_{32,m} \chi_{z,m+1,n})} = \frac{\beta_{z,m} + \alpha_{23,m} \chi_{y,m+1,n} + \alpha_{33,m} \chi_{z,m+1,n} + \chi_{z,m,n} (\beta_{x,m} + \alpha_{21,m+1} \chi_{y,m+1,n} + \alpha_{31,m+1} \chi_{z,m+1,n} - 1)}{\chi_{z,m,n} (\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m} \chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m} \chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{13,m} - \alpha_{23,m} \chi_{y,m+1,n} - \alpha_{33,m} \chi_{z,m+1,n})}.$$
(15)

Анализ полученной системы уравнений показывает, что в нее вошли шесть неизвестных величин $\beta_{x,m}$, $\beta_{y,m}$, $\beta_{z,m}$, γ_m , β_m , φ_m , известная константа F, а также измеряемые посредством фотоматриц величины $\chi_{y,m,n}$, $\chi_{z,m,n}$, $\chi_{y,m+1,n}$, $\chi_{z,m+1,n}$. Параметры посредством фотоматрицы получают в процессе обработки изображений земной поверхности, причем эта процедура является важной для достижения высокой точности определения счисляемых координат подвижного объекта. Поэтому необходимо, чтобы осуществлялась

субпиксельная обработка изображения, поскольку размерность и разрядность современных фотоматриц пока еще не достаточна для получения хороших результатов при попиксельной обработке [10].

Для решения указанной нами задачи необходимо иметь шесть нелинейных алгебраических уравнений с шестью неизвестными. Однако следует иметь в виду, что главным условием определения координат является использование шести точек на земной поверхности, из которых три не лежат на одной прямой. Для упрощения полученных уравнений необходимо исключить следующие перемен-

ные $\beta_{x,m}$, $\beta_{y,m}$, $\beta_{z,m}$. Поэтому нужно ввести следующие обозначения:

$$B_{x,m,n} = \frac{\chi_{z,m,n}}{\chi_{y,m,n}(\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m}\chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{12,m} - \alpha_{22,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{32,m}\chi_{z,m+1,n})}{\chi_{z,m,n}(\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m}\chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{13,m} - \alpha_{23,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{33,m}\chi_{z,m+1,n})};$$

$$B_{y,m,n} = \frac{1}{\chi_{y,m,n}(\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m}\chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{12,m} - \alpha_{22,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{32,m}\chi_{z,m+1,n})};$$

$$B_{z,m,n} = -\frac{1}{\chi_{z,m,n}(\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m}\chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{13,m} - \alpha_{23,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{33,m}\chi_{z,m+1,n})};$$

$$\frac{\beta_{y,m} + \alpha_{22,m}\chi_{y,m+1,n} + \alpha_{32,m}\chi_{z,m+1,n} + \chi_{y,m,n}\beta_{x,m} + \alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} + \alpha_{31,m}\chi_{z,m+1,n} - 1)}{\chi_{y,m,n}(\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m}\chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{12,m} - \alpha_{22,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{32,m}\chi_{z,m+1,n})};$$

$$-\frac{\beta_{z,m} + \alpha_{23,m}\chi_{y,m+1,n} + \alpha_{33,m}\chi_{z,m+1,n} + \chi_{z,m,n}(\beta_{x,m} + \alpha_{21,m+1}\chi_{y,m+1,n} + \alpha_{31,m+1}\chi_{z,m+1,n} - 1)}{\chi_{z,m,n}(\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m}\chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{13,m} - \alpha_{23,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{33,m}\chi_{z,m+1,n})}};$$

$$-\frac{\alpha_{23,m}\chi_{y,m+1,n} + \alpha_{33,m}\chi_{z,m+1,n} + \chi_{z,m,n}(\alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} + \alpha_{31,m+1}\chi_{z,m+1,n} - 1)}{\chi_{z,m,n}(\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m}\chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{13,m} - \alpha_{23,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{33,m}\chi_{z,m+1,n})}}{\chi_{z,m,n}(\alpha_{11,m} - \alpha_{21,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{31,m}\chi_{z,m+1,n}) + (\alpha_{13,m} - \alpha_{23,m}\chi_{y,m+1,n} - \alpha_{33,m}\chi_{z,m+1,n})}};$$

С учетом обозначений система уравнений (15) принимает вид:

$$B_{x m n} \beta_{x m} + B_{y m n} \beta_{y m} + B_{z m n} \beta_{z m} = C_{m n}, (16)$$

Первые три уравнения системы (16) относительно величин $\beta_{x,m}$, $\beta_{y,m}$, $\beta_{z,m}$ представляют собой систему линейных уравнений [11], решение которых находим по следующим формулам

$$C_{m,1}B_{y,m,2}B_{z,m,3} + C_{m,3}B_{y,m,1}B_{z,m,2} + C_{m,2}B_{y,m,3}B_{z,m,1} - \frac{-C_{m,1}B_{y,m,3}B_{z,m,2} - C_{m,2}B_{y,m,1}B_{z,m,3} - C_{m,3}B_{x,m,3}B_{y,m,2}}{B_{x,m,1}B_{y,m,2}B_{z,m,3} + B_{y,m,1}B_{z,m,2}B_{x,m,3} + B_{z,m,1}B_{x,m,2}B_{y,m,3} - \frac{-B_{z,m,1}B_{y,m,2}B_{x,m,3} - B_{x,m,1}B_{z,m,2}B_{y,m,3} - B_{y,m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3}}{C_{m,1}B_{x,m,3}B_{z,m,2} + C_{m,3}B_{x,m,2}B_{z,m,1} + C_{m,2}B_{z,m,3}B_{x,m,1} - \frac{-C_{m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3} - C_{m,2}B_{x,m,3}B_{z,m,1} - C_{m,3}B_{x,m,1}B_{z,m,2}}{B_{x,m,1}B_{y,m,2}B_{z,m,3} + B_{y,m,1}B_{z,m,2}B_{x,m,3} + B_{z,m,1}B_{x,m,2}B_{y,m,3} - \frac{-B_{z,m,1}B_{y,m,2}B_{x,m,3} - B_{x,m,1}B_{z,m,2}B_{y,m,3} - B_{y,m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3}}{C_{m,1}B_{y,m,2}B_{x,m,3} - C_{m,2}B_{x,m,1}B_{y,m,2} + C_{m,2}B_{y,m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3}} - \frac{-C_{m,1}B_{y,m,2}B_{x,m,3} - C_{m,2}B_{x,m,1}B_{y,m,2} + C_{m,2}B_{y,m,1}B_{x,m,2}B_{y,m,1}}{B_{x,m,1}B_{y,m,2}B_{z,m,3} + B_{y,m,1}B_{z,m,2}B_{x,m,3} + B_{z,m,1}B_{x,m,2}B_{y,m,3} - C_{B_{z,m,1}}B_{y,m,2}B_{z,m,3} + B_{y,m,1}B_{z,m,2}B_{y,m,3} - B_{y,m,1}B_{x,m,2}B_{y,m,3} - B_{z,m,1}B_{y,m,2}B_{z,m,3} - B_{x,m,1}B_{z,m,2}B_{y,m,3} - B_{y,m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3}} - B_{z,m,1}B_{y,m,2}B_{z,m,3} - B_{z,m,1}B_{z,m,2}B_{y,m,3} - B_{y,m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3}} - B_{z,m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3} - B_{y,m,1}B_{z,m,2}B_{z,m,3} - B_{y,m,1}B_{z,m,2}B_{z,m,3} - B_{y,m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3}} - B_{z,m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3} - B_{y,m,1}B_{z,m,2}B_{z,m,3} - B_{z,m,1}B_{z,m,2}B_{z,m,3} - B_{z,m,1}B_{z,m,2}B_{z,m,3} - B_{$$

Подставив выражения (17) в три последних уравнения системы (16), получаем систему нелинейных алгебраических уравнений относительно угловых величин γ_m , β_m , φ_m ,

$$B_{x,m,n}(C_{m,1}B_{y,m,2}B_{z,m,3} + C_{m,3}B_{y,m,1}B_{z,m,2} + C_{m,2}B_{y,m,3}B_{z,m,1} - C_{m,1}B_{y,m,3}B_{z,m,2} - C_{m,2}B_{y,m,1}B_{z,m,3} - \\ -C_{m,3}B_{x,m,3}B_{y,m,2}) + B_{y,m,n}(C_{m,1}B_{x,m,3}B_{z,m,2} + C_{m,3}B_{x,m,2}B_{z,m,1} + C_{m,2}B_{z,m,3}B_{x,m,1} - C_{m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3} - \\ -C_{m,2}B_{x,m,3}B_{z,m,1} - C_{m,3}B_{x,m,1}B_{z,m,2}) + B_{z,m,n}(C_{m,1}B_{y,m,3}B_{x,m,2} + C_{m,3}B_{x,m,1}B_{y,m,2} + C_{m,2}B_{y,m,1}B_{x,m,3} - \\ -C_{m,1}B_{y,m,2}B_{x,m,3} - C_{m,2}B_{x,m,1}B_{y,m,3} - C_{m,3}B_{x,m,2}B_{y,m,1}) = C_{m,n}(B_{x,m,1}B_{y,m,2}B_{z,m,3} + B_{y,m,1}B_{z,m,2}B_{x,m,3} + \\ +B_{z,m,1}B_{x,m,2}B_{y,m,3} - B_{z,m,1}B_{y,m,2}B_{x,m,3} - B_{x,m,1}B_{z,m,2}B_{y,m,3} - B_{y,m,1}B_{x,m,2}B_{z,m,3}),$$

$$(18)$$

где n = 4, 5, 6.

Система уравнений (18) с учетом выражений (15) описывает функциональную связь

между неизвестными углами γ_m , β_m , ϕ_m перемещения подвижного объекта из одного его последовательного положения в другое, в кото-

рых производилась фотоэкспозиция, и измеряемыми величинами $\chi_{y,m}$, $\chi_{z,m}$, $\chi_{y,m+1}$, $\chi_{z,m+1}$ для каждой из 6 особых точек, а также известным фокусным расстоянием объектива F.

Решение системы уравнений (18) относительно углов γ_m , β_m , φ_m осуществляют методом простых итераций, Ньютона или Брауна [12]. Вычисляют компоненты поступательного перемещения подвижного объекта по формулам

$$x_{o,m} = F\beta_{x,m}, y_{o,m} = F\beta_{y,m}, z_{o,m} = F\beta_{z,m}$$
 (19)

Описанное снижение порядка системы уравнений (15) с шести до трех позволяет снизить потребные для ее решения ресурсы цифрового вычислителя.

Заключение

Таким образом, решена задача счисления координат БЛА с использованием видеопоследовательностей изображений земной поверхности при наличии только одной видеокамеры. Для решения задачи определения местоположения выделяли и определяли координаты особых точек на изображении поверхности. Для нахождения особых точек была выполнена обработка оцифрованного изображения методом FAST-9. Так как изображение получается цветным, то процедура нахождения особых точек является надежным путем применения метода FAST-9 для двух или даже трех цветовых компонент. Данная процедура позволяет достигнуть высокой точности определения счисляемых координат БЛА. Главным условием определения координат является использование 6 точек на земной поверхности, из которых 3 не лежат на одной прямой. Для решения задач счисления координат предпочтительно использование методов простых итераций, Брауна или Ньютона.

Литература

1. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспи-

- лотными летательными аппаратами. В 2-х кн. Кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. М.: Изд. «Радиотехника», 2016. 507 с. Кн. 2. Робототехнические комплексы на основе БЛА. М.: Изд. «Радиотехника», 2016. 821 с.
- 2. Гришин В.А. Системы технического зрения в решении задач управления беспилотными летательными аппаратами // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 46-52.
- 3. Купервассер О.Ю., Рубенштей А.А. Система навигации БЛА с помощью видео // IV конференция "ТРИЗ. Практика применения методических инструментов", 2012. С 1-6
- 4. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратах / К.К. Веремеенко, С.Ю. Желтов, Н.В. Ким, Г.Г. Себряков, М.Н. Красильщиков. М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2009. 556 с.
- 5. Дмитроченко Л.А. Анализ точности автономных инерциальных навигационных систем. М.: МАИ, 1979. 55 с.
- 6. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптикоэлектронных приборов: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Советское радио, 1980. 392 с.
- 7. Пат. 2401436 Российская Федерация, МПК7 G 01s 11/00. Способ измерения координат объекта и устройство для его осуществления / Бондарев В. Г., Бондарев В.В., Бондарев М.В.; заявитель и патентообладатель авторы. № 2008110814/09; заявл. 24.03.08; опубл. 10.10.10, Бюл. № 28. 4 с.: ил.
- 8. Пат. 2700908 Российская Федерация, МПК В64F 1/18 G05D 1/00. Способ определения координат летательного аппарата относительно взлетно-посадочной полосы / Агеев А.М., Бондарев В. Г., Ипполитов С.В., Лопаткин Д.В., Озеров Е.В., Проценко В.В., Смирнов Д.А.; заявитель и патентообладатель авторы. № 2018112532; заявл. 06.04.18; опубл. 23.09.19, Бюл. № 27. 8 с.: ил.
- 9. Альтман Е.А., Захаренко Е.И. Высокопроизводительный метод повышения визуального качества изображения объекта на видеопоследовательности // Омский научный вестник. Сер.: Приборы, машины и технологии. 2013. № 3 (123). С. 247–250.
- 10. Обработка и распознавание изображений объектов, полученных посредством СТЗ ЛА / В.Г. Бондарев, Д.А. Смирнов, Н.И. Майгурова, А.В. Николенко, К.Ю. Гусев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 34-42.
- 11. Вержбицкий В.М. Численные методы. Линейная алгебра и нелинейные уравнения: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2000. 266 с.
- 12. Ермаков В.В., Калиткин Н.Н. Оптимальный шаг и регуляризация метода Ньютона // Вычислительная математика и математическая физика. 1981. Т. 21. № 2. С. 491-497.

Поступила 11.05.2021; принята к публикации 23.08.2021

Информация об авторах

Смирнов Д**митрий 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, 54A), e-mail: vaiu@mil.ru

Тепловодский Александр Владимирович - заместитель командира войсковой части 15650 по ИМ и НИР, Государственный лётно-испытательный центр Министерства обороны имени В.П. Чкалова (416504, Россия, г. Ахтубинск), e-mail: aodk25@rambler.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

SOLVING THE PROBLEM OF DETERMINING THE LOCATION OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE IN THE COORDINATE COUNTING MODE USING A TECHNICAL VISION SYSTEM

D.A. Smirnov¹, V.G. Bondarev², A.V. Teplovodskiy¹, A.V. Nikolenko²

¹State Flight Test Center named after V.P. Chkalov, Military unit 15650, Akhtubinsk, Russia ²Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy", Voronezh, Russia ³Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we present the rationale for the use of an optoelectronic system as a navigation-measuring complex. We carried out a brief analysis of existing navigation systems applicable to an unmanned aerial vehicle and propose an algorithm for providing a video surveillance system in the reckoning mode using a vision system. The problem of reckoning UAV coordinates using video sequences of images of the earth's surface can be solved with high accuracy using a binocular TVS. However, in case of failure of one of the cameras, the determination of the coordinates of the location will continue with sufficient accuracy to solve the task. And the lack of measuring instruments is ensured through the use of 6 special points of the earth's surface. Therefore, we propose an algorithm for determining the location using a monocular vision system. To solve the problem of determining the location, we selected and determined the coordinates of the singular points on the surface image. To find the special points, we processed the digitized image using the FAST-9 method. Since the image is obtained in color, the procedure for finding special points is reliable by applying the FAST-9 method for two or even three color components. This procedure allows you to achieve high accuracy in determining the reckoning coordinates of the UAV. To solve problems of reckoning coordinates, it is preferable to use the methods of simple iterations, Brown or Newton

Key words: coordinate counting, monocular vision system, location detection, unmanned aerial vehicle

References

- 1. Verba V.S., Tatarskiy B.G. "Complexes with unmanned aerial vehicles" ("Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami") in 2 volumes, volume 1 "Principles of construction and features of the use of complexes with UAVs" ("Printsipy postroyeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA"), 507 p., volume 2 "Robotic complexes based on UAVs" ("Robo-totekhnicheskie kompleksy na osnove BLA"), Moscow, Radio Tekhnika, 2016, 821 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. Kuperwasser O.Yu., Rubenstey A.A. "Navigation system of UAVs with the help of video", *IV Conf. "TRIZ. Practice of using methodological tools" (IV konferentsiya "TRIZ. Praktika primeneniya metodicheskikh instrumentov")*, 2012, pp. 1-6.
- 4. Veremeenko K.K., Zheltov S.Yu., Kim V.N., Sebryakov G.G., Krasel'shchikov M.N. "Modern information technologies in the task navigation and guidance maneuverable unmanned aircraft" ("Sovremennye informatsionnye tekhnologii v zadachakh navigatsii i navedeniya bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatakh"), Moscow, FIZMATLIT, 2009, 556 p.
- 5. Dmitrochenko L.A. "Analysis of the accuracy of the Autonomous inertial navigation systems" ("Analiz tochnosti avtonom-nykh inertsial navigatsionnykh sistem") Moscow MAI 1979 55 n
- nykh inertsial'nykh navigatsionnykh sistem"), Moscow, MAI, 1979, 55 p.
 6. Yakushenkov Yu.G. "Theory and calculation of optoelectronic devices" ("Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov"), textbook for universities, Moscow, Sovetskoe radio, 1980, 392 p.
- 7. Bondarev V.G., Bondarev V.V., Bondarev M.V. "A method for measuring the coordinates of an object and a device for its implementation" ("Sposob izmereniya koordinat ob"ekta i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya"), patent 2401436 Russian Federation, IPC7 G 01s 11/00, publ. 10.10.10, bull. 28, 4 p.
- 8. Ageev A.M., Bondarev V.G., Ippolitov S.V., Lopatkin D.V., Ozerov E.V., Protsenko V.V., Smirnov D.A. "Method for determining the coordinates of the aircraft relative to the runway" ("Sposob opredeleniya koordinat letatel'nogo apparata otnositel'no vzletno-posadochnoy polosy"), patent 2700908 Russian Federation, IPC7 B64F 1/08 G05D 1/00, application 06.04.18, publ. 23.09. 19, bull. no. 27, 8 p.
- 9. Altman E.A., Zakharenko E.I. "High-performance method for improving the visual quality of an object image on a video sequence", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2013, no. 3 (123), pp. 247-250.
- 10. Bondarev V.G., Smirnov D.A., Maigurova N.I., Nikolenko A.V., Gusev K.Yu. "Processing and image recognition received by STZ LA", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*), 2019, vol. 15, no. 3, pp. 34-42.
- 11. Verzhbitskiy V.M. "Numerical methods. Linear algebra and nonlinear equations" ("Chislennye metody. Lineynaya algebra i nelineynye uravneniya"), textbook, Moscow, Vysshaya shkola, 2000, 266 p.
- 12. Ermakov V.V., Kalitkin N.N. "Optimal step and regularization of the Newton method", Computational Mathematics and Mathematical Physics (Vychislitel'naya matematika i matematicheskaya fizika), 1981, vol. 21, no. 2, pp. 491-497.

Submitted 11.05.2021; revised 23.08.2021

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, Aassociate 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. Teplovodskiy, Deputy Commander of the Military Unit 15650, State Flight Test Center named after V.P. Chkalov (Akhtubinsk 416504, Russia), e-mail: aodk25@rambler.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), e-mail: nikolenko.alexandr.93@yandex.ru

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.007 УДК 004.9

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДОСТУПА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

Ю.С. Шевнина, Л.Г. Гагарина, А.В. Чирков, Н.С. Миронов

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград, Россия

Аннотация: исследовано три решения проблематики нелинейного процесса организации доступа в АИС образовательного спектра. Определены ключевые причины появления затруднений с использованием автоматизированных информационных систем и проведен анализ существующих средств и методик, которые применяются при организации взаимодействия между пользователями и АИС. Статья объясняет, каким образом можно упростить доступ к АИС путем использования принципов декомпозиции и иерархичности. В реализации указано, какой может быть структура АИС типового образовательного учреждения. Проведено сравнение преимуществ и недостатков разных систем бухгалтерского, управленческого, хозяйственно-экономического учета с точки зрения интеграции в работу высших учебных заведений. Отдельное внимание уделено анализу механизмов и особенностей взаимодействия между подсистемами АИС и базой данных на примере проведения аттестационных мероприятий. На основании изученных аспектов функционирования АИС сделан вывод о недостаточности использования вузами локальных систем и необходимости разработки и последующей интеграции персонализированных высокотехнологичных решений, которые позволят увеличить эффективность образовательной деятельности. В перспективах показано, какие задачи можно поставить перед собой, чтобы внедрить дополнительные аспекты декомпозиции и иерархичности в аналогичных системах

Ключевые слова: АИС, ИР, ИС, декомпозиция, иерархичность, сущность, система, подсистема, БД, структура

Введение

Работа с информационными ресурсами (ИР) может значительно усложняться из-за проблем с доступом, обусловленных применением поискового интерфейса, для различных пользователей автоматизированных информационных систем (АИС). В частности, сложности могут возникать у представителей образовательной сферы. Тематические порталы, размещаемые в Интернете, группируются по широкому спектру характеристик и доступны пользователям без ограничений. Взаимодействие происходит благодаря интерфейсам поиска, чье функционирование преимущественно базируется на широко используемой терминологии. На практике из-за несоответствия наименований поисковых параметров для АИС, приводящих к появлению сложностей у отдельных категорий пользователей, возникает потребность в ограничении доступа к информации и проведении оптимизации.

Для решения означенных проблем необходимо разработать механизм организации доступа к ресурсам системы [1], более того, для задач формирования профилированных интерфейсов пользователей, структура элементов которых адаптирована к особенностям конкретного

- 1. Затруднение доступа различным категориям пользователей в связи с применением общего пользовательского интерфейса.
- 2. Критическое накопление информационных ресурсов.
- 3. Отсутствие специализированной терминологии для параметров АИС.
- 4. Сложная настройка прав доступа к различным ИР.
- 5. Сложность предварительного определения задач при разработке технического задания.
- 6. Перманентное администрирование АИС из-за частых сбоев.
- 7. Низкая ИТ-квалификация сотрудников предметной области.

Анализ существующих АИС

В целях устранения причин проблемной ситуации при разработке АИС проведем анализ

пользователя, требуется анализ нелинейного процесса организации доступа. Такой подход позволит получать только те данные и ту информацию, которая касается каждого отдельно взятого статуса. Также следует определить политику информационной безопасности и требования по разграничению прав доступа. Таким образом, означенная проблемная ситуация и, соответственно, актуальность представленной работы определяется следующими причинами:

 $^{\ \, \}mathbb {C}$ Шевнина Ю.С., Гагарина Л.Г., Чирков А.В., Миронов Н.С., 2021

современных подходов/принципов/методов и средств, используемых для организации доступа в существующих АИС.

Среди методов необходимо отметить методы теории информации, теории множеств и графов, принципы объектно-ориентированной парадигмы проектирования. К недостаткам указанных методов и подходов относятся:

- усложнение методологии: объектноориентированный подход требует введения дополнительных способов представления информации о предметной области;
- невысокая производительность функционирования программного обеспечения и высокие начальные затраты;
- сложность кодирования и декодирования информации, влекущей за собой использование дополнительных вычислительных ресурсов;
- сложность построения дерева графов для подсистем АИС с учетом их составляющих;
- противоречивость в допущениях множеств и подмножеств элементов, создание конфликтных процессов (парадокс Рассела и др.) [2].

Для понимания особенностей применяемых средств для организации доступа в АИС рассмотрим популярные в настоящее время системы в различных сферах жизнедеятельности, в том числе в сфере образования, в частности, "Axapta", "Парус", "1С:Университет", Microsoft Business Solutions-Navision, Alfa.

Особенности организации доступа в структуре системы "Axapta":

- Есть необходимость в автоматизации минимум 25 рабочих мест (в целом до 500) в таком случае затраты на интеграцию софта будут экономически обоснованными;
- Внедренное ПО предназначено для управления широким спектром узкоспециализированных процессов и может адаптироваться под разные виды задач, чего не может обеспечить стандартная ERP-система;
- Благодаря комплексному подходу к программной оптимизации исчезает потребность в установке и применении большого количества утилит.

Особенности организации доступа в структуре системы "Парус":

• Модульный принцип построения программного комплекса. Автоматизация каждого вида деятельности осуществляется при помощи специального модуля, при этом сохраняется возможность их независимого функционирова-

ния либо интеграции с другими элементами системы информационного пространства университета;

- Рассчитана на внедрение в работу хозяйственно-расчетных предприятий всевозможной специализации малого и среднего масштаба. С помощью системы удается автоматизировать различные аспекты деятельности, начиная от кадрового, складского и бухучета, заканчивая торговыми процессами. Предназначена для подключения в локальную сеть с 15-20 узлами.
- Обеспечение эффективной обработки и защиты данных для архитектуры "клиент-сервер" и СУБД Oracle, масштабируемости и надежности.

В прочих корпоративных информационных и автоматизированных информационных системах, в той или иной степени присутствуют указанные особенности. Каждая из вышеуказанных систем имеет недостатки в виде ограничения количества пользователей, нерентабельности и сложности доступности к модулям.

АИС сферы образования является производной от любой типовой АИС, применяемой в производстве и других сферах. Среди таковых можно отметить системы Microsoft Business Solutions-Navision, Site Line, Alfa. Каждая из них обладает своими функциональными возможностями. Рассмотрим подробнее функции, которые отвечают за организацию доступа в каждой из них [3].

Особенности организации доступа в структуре системы "1C:Университет":

- Структура в 1С это динамический набор данных (коллекция значений), каждый элемент которой состоит из пары «Ключ» и «Значение»;
- Ключи структуры являются уникальными, поэтому ими можно идентифицировать значения;
- К значениям структуры можно обращаться как к свойствам объекта, при этом ключ используется как имя свойства.

Особенности организации доступа в структуре системы Microsoft Business Solutions-Navision:

- Поддержка различных моделей учета бухгалтерского, управленческого, учета по международным стандартам IAS, GAAP и др.;
- Учет распоряжений по персоналу: приказы на прием, перевод, увольнение и т.д.;
- Произвольное формирование ролей и профилей с учетом функциональных обязанностей;

- Ролевой портал для сотрудников компании;
- Поддержка электронного документооборота в различных форматах;
- Полная интеграция со всеми контурами Microsoft Navision. Единый ввод данных.

Особенности организации доступа в структуре системы Site Line:

- Обеспечивает бесперебойную работу предприятия (синхронизацию материалов и производственных потребностей, контроль и пополнение запасов) благодаря функционированию в реальном времени;
- В автоматическом режиме осуществляет анализ бухгалтерской периодичности, плана счетов и форм выходных документом, генерируя отчеты установленного образца;
- Предусмотрены дополнительные модули, оптимизирующие процесс бухгалтерского, складского учета, а также управления технико-экономической деятельностью и основными производственными циклами.

Особенности организации доступа в структуре системы Alfa:

- Имеет широкий функционал, адаптируемый под специфику различных бизнеспроцессов;
- За счет изменения параметров настройки функциональных моделей происходит контроль и коррекция стандартов и видов учета, а также операционных и экономических схем, что позволяет добиться персонализации деятельности;
- Дает возможность использовать материально-техническую базу и персонал с максимальной эффективностью;
- Работа модулей базируется на оценке будущего спроса, а финишные настройки определяются после анализа поступивших от клиентов заказов;
- Есть возможность быстрого просчета фактической себестоимости, включая операционные и налоговые затраты.

Для устранения указанных недостатков предложены следующие решения при организации доступа в АИС:

- 1. Решение в виде нелинейного процесса организации доступа к объединенным АИС с использованием статусных интерфейсов пользователей;
- 2. Решение в виде описания процесса формирования статусных интерфейсов пользователя, основанное на представлении элемента интерфейса в виде дерева.
- 3. Решение в виде построения структуры элементов, которая адаптирована к деятельно-

сти в образовательном спектре с использованием принципов декомпозиции и иерархичности.

Реализацию предложенных решений необходимо предварить анализом особенностей управления доступом. К произвольному управлению доступом относится управление правами доступа с использованием списков доступа. Такой формат приобрел наибольшее распространение за счет своей гибкости. Фактически есть возможность устанавливать права доступа и дополнительные параметры для каждой существующей пары «субъект-объект», что открывает широкие возможности для оптимизации. При этом нужно принимать во внимание, что из-за рассредоточенности управления в категорию доверенных могут попасть наряду с администраторами и операторами другие сотрудники. В свою очередь, их непрофессионализм или невнимательность способны привести к распространению конфиденциальных данных. Избежать подобной проблемы позволит интеграция жестких механизмов мониторинга и соблюдения положений принятой на предприятии системы информационной безопасности. Чем больше пользователей, тем сложнее отслеживать и корректировать процесс управления правами доступа [10].

Ролевое управление доступом в АИС

Чтобы сделать управление работой систем максимально простым и эффективным, применяется ролевая модель. В зависимости от присвоенной роли пользователь имеет право доступа и выполнения тех или иных операций с определенным кругом объектов (рис. 1). В этом и заключается принцип декомпозиции в данном процессе, т.к. систему "разбивают" на несколько мелких подсистем соответствующих ролям [9]. Одному пользователю одновременно может принадлежать несколько ролей, тогда как каждая из ролей дает пользователю определенные права. В данном случае проявляется иерархичность, а ее суть состоит в том, что между пользователями и их разрешениями появляются промежуточные сущности - роли, которые представляют собой наборы разрешений. Таким образом, получаем в результате нелинейный процесс, т.к. каждый пользователь - Хп, и он имеет доступ только к определенным ролям Rn, но эти роли имеют разные права доступа Pn, которые, в свою очередь, присутствуют у пользователей разных ролей. Тогда имеем систему вида [8]:

$$\begin{cases} R1X1 + X2 + \dots + Xn = P1 \\ \vdots \\ Y1 + Y2 + X1 = P2 \\ \dots + X2 + RkXn = Pm \end{cases}$$

где n - нумерация, X - пользователь, R - предоставленная роль, Y - дополнительные показатели для предоставления прав доступа (в частности, наличие ученой степени, разрядности специалиста и т.д.), Р - предоставленные права доступа. В указанных выше уравнениях X - это одна переменная (один человек), но она действует в разных условиях и на неё разные переменные оказывают влияние. Это и есть нелинейный процесс, проблематику которого рассматриваем в рамках этой статьи.



Рис. 1. Роли пользователей

Значительным преимуществом ролевой модели следует назвать нейтральное отношение, как к видам прав доступа, так и к методикам их анализа. По отдельным аспектам, в частности по способности гарантировать контроль системы разграничения доступа при любом количестве пользователей, такой тип управления можно считать декомпозицией — одной из составляющих ООП. Упрощение администрирования происходит благодаря формированию связей между ролями, похожих на те, что используются в ООС [9].

В случае выбора ролевого принципа на этапе дифференциации прав доступа к ИС есть возможность контролировать не только использование информационных ресурсов, но и параметры интерфейсов пользователей. Иными словами, сформировав роли для конкретного пользователя, можно упростить построение модели в дальнейшем, т.к. каждый пользователь, являясь частью иерархичности, может наследовать и передавать роли другим пользователям.

Применим вышеизложенное к АИС в сфере образования. Допустим, есть роль "студент 2 курса". Для "студента 1 курса" она неактуальна, а права доступа у них разные, но как только

"студент 1 курса" закончит первый год обучения, он унаследует права "студента 2 курса" и тем самым оправдает данную реализацию [4]. Аналогично и с изменениями под конкретный департамент в образовательном спектре вообще для полноценной работы каждого пользователя [5].

Однако нельзя допустить, чтобы, предположим, пользователь с ролью "студент" мог иметь доступ к роли "бухгалтер" и права доступа к ведомостям. Это сложный процесс, но именно для этого необходимо воспользоваться принципами декомпозиции, разбить задачи на подзадачи и прописывать роли и права доступа точечно, а потом объединить в более крупные группы [6]. Выбранный в качестве метода разграничения доступа ролевой метод соответствует современному этапу развития программирования позволяет отразить сколь угодно сложную политику информационной безопасности и разграничить права доступа к ИР и обеспечить управление элементами интерфейса в зависимости от заранее назначенных ролей пользовате-

Обобщим и изложим следующие недостатки организации доступа.

- 1. Наличие разного количества модулей в каждом из решений, что препятствует унификации рабочего процесса.
- 2. Каждая АИС обладает своей спецификой в области используемого программного обеспечения и СУБД.
- 3. Интеграция для инициализации пользователей происходит с разными продуктами в каждой АИС.

АИС оценивания знаний

Указанные проблемы устраняются предлагаемым решением с помощью нелинейности процесса доступа и использования принципов декомпозиции и иерархичности. Поскольку автоматизированная информационная система это совокупность связанных между собой подсистем, есть смысл рассматривать одну из самых крупных. Предложим структуру, позволяющую описать АИС оценивания знаний, как неотьемлемую часть любого образовательного учреждения, которая позволяет специфицировать как функции разрабатываемой информационной системы, так и обрабатываемые ею данные [7].

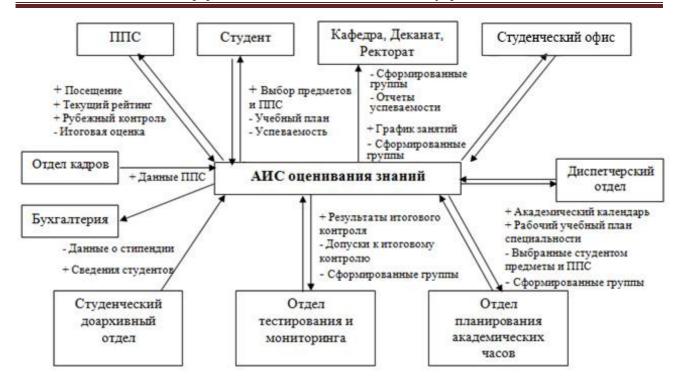


Рис. 2. Структура АИС оценивания знаний

Проектируемая АИС оценивания знаний, в которой реализованы принципы декомпозиции и иерархичности, содержит упрощения там, где значения статичны, они передаются без расчетов и аналитики [4]. Предложенная АИС содержит подсистемы и структуры подсистем, т.е. на верхнем уровне подсистемы "Студент", "ППС" (профессорско-преподавательский состав), "Кафедра"/"Деканат"/"Ректорат/Студенческий офис", а на нижнем уровне остальные департаменты типового образовательного учреждения. Знак "+" рядом с блоком департамента означает вход, а знак "-" выход (входные и выходные данные) [1].

Взаимодействие БД с АИС

Информация подсистемы находится в тесном взаимодействии с базой данных (БД), содержащей сведения об успеваемости студентов и функционирующей в связке с другими компонентами АИС (рис. 3). Техническая и программная части синхронизированы с информацией из общего банка данных, в частности, с принадлежностью учащихся к определенному курсу, факультету и специальности. Подобное взаимодействие позволяет оптимизировать для студентов поиск преподавателей и конкретных дисциплин [8].

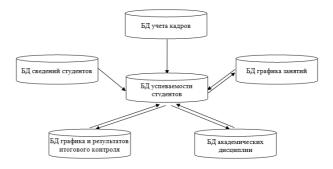


Рис. 3. Взаимодействие БД в системе

Как только выбор сделан, в автоматическом режиме происходит составление списков академических групп. Они, в свою очередь, синхронизируются с другими базами данных: учебного графика, академических дисциплин, плана и итогов аттестационных мероприятий. Таким образом, преподаватели формируют расписание проверок, БД успеваемости составляет и предоставляет форму для заполнения оценками по 100-балльной шкале. Затем информация о допусках поступает в БД графика и результатов итогового контроля, где формируется конечная оценка по предмету.

Заключение

Для достижения поставленных стратегических целей и сохранения конкурентных преимуществ вузу требуется проводить мероприятия по разработке АИС и интеграции передовых информационных технологий для их эффективного управления. Наиболее перспективным представляется формирование единой информационной среды высшего учебного заведения, объединяющей в себе синхронизированные АИС [1]. Это связано с тем, что эффективное управление вузом с использованием локальных систем невозможно. Однако проблематика нелинейного процесса организации доступа к таким системам не позволяет без исследований и внесения изменений быстро внедрить ее в конкретное высшее учебное заведение. Продолжая исследовательскую деятельность и используя существующие наработки в области организации доступа на принципах декомпозиции и иерархичности, можно значительно повысить эффективность вузовской образовательной среды.

Литература

- 1. Ершеева Р.М. Анализ требований к Автоматизированной Информационной Системе оценивания знаний обучающихся // Молодой ученый. 2011. № 11 (34). Т. 1. С. 70-74. URL: https://moluch.ru/archive/34/3924/ (дата обращения: 08.05.2021).
- 2. Арсеньев Ю.Н. Информационные системы и технологии. М.: ЮНИТИ-ДАА, 2006.
- 3. Гагарина Л.Г. Современные проблемы информатики и вычислительной техники. М.: МИЭТ, 2017. 204 с.

- 4. Квач А.И., Чирков А.В. Сравнение решений по автоматизации процесса назначения стипендии на основе научных достижений студентов // Аспирант и соискатель. 2020. № 6. С. 22-25.
- 5. Средства поддержки формирования и объединения метаописаний разнородных гетерогенных информационных ресурсов. Отчет о НИР (этап 2005-2006)/ МОЦНИТ МИЭТ, рук. Чаплыгин Ю.А. Шифр 737-ГБ-Целевые-РФФИ-МОЦНИТ.
- 6. Формирование и объединение метаописаний разнородных гетерогенных информационных ресурсов для поддержки образовательной деятельности вуза / И.Г. Игнатова, А.В. Бобкова, А.Ю. Павлов, Н.Ю. Соколова, Ю.С. Шевнина, А.Ю. Чаплыгин // Новые образовательные технологии в вузе тезисов докладов. Екатеринбург: Изд-во УПИ, 2005. С. 240-241.
- 7. Квач А.И., Чирков А.В. Оптимизация затрат и ресурсов для обеспечения работы кадрового состава при SEO оптимизации // Аспирант и соискатель. 2021. № 1. С. 18-21.
- 8. Гагарина Л.Г. Информационные технологии в менеджменте: курс лекций. М.: МИЭТ, 2015. 244 с.
- 9. Development of an Approach to Automatic Test Generation Based on the Graph Model of a Cache Hierarchy / L.G. Gagarina, A.V. Garashchenko, K.Z. Ye, E. Dorogova, M. Kochneva // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus, 2020. P. 1940-1944.
- 10. Development of Methods to Improve the Efficiency of Information Transmission in Mobile Video Streaming Systems / L.G. Gagarina, R.A. Kasimov, E.M. Portnov, P.A. Fedorov, A.K. Myo // Proceedings of the 2020 The 8th International Conference on Control, Mechatronics and Automation. P. 232-236.

Поступила 17.06.2021; принята к публикации 23.08.2021

Информация об авторах

Шевнина Юлия Сергеевна — канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1), e-mail: incos@miee.ru Гагарина Лариса Геннадьевна — д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1), e-mail: incos@miee.ru Чирков Андрей Владимирович — аспирант, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1), e-mail: incos@miee.ru Миронов Николай Сергеевич — аспирант, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (124498, Россия, г. Москва, Зеленоград, Площадь Шокина, д. 1), e-mail: incos@miee.ru

FEATURES OF ORGANIZATION OF ACCESS IN AUTOMATED INFORMATION SYSTEMS BASED ON THE PRINCIPLES OF NONLINEAR DYNAMICS

Yu.S. Shevnina, L.G. Gagarina, A.V. Chirkov, N.S. Mironov

National Research University "MIET", Zelenograd, Russia

Abstract: we investigate three solutions to the problem of the nonlinear process of organizing access to the AIS of the educational spectrum. We identified the key reasons for the emergence of difficulties with the use of automated information systems and carried out the analysis of existing tools and techniques that are used in organizing interaction between users and AIS. We explained in what way we can simplify the access to AIS by using the principles of decomposition and hierarchy. The implementation indicates what the structure of the AIS of a typical educational institution can be. We carried out comparison of the advantages and disadvantages of different systems of accounting, managerial economic and economic accounting from the point of view of integration into the work of higher educational institutions. Special attention is paid to the analysis of the mechanisms and features of the interaction between the AIS subsystems and the database on the example of carrying out certi-

fication activities. On the basis of the studied aspects of the functioning of the AIS, we made a conclusion about the insufficient use of local systems by universities and the need for the development and subsequent integration of personalized high-tech solutions that will increase the efficiency of educational activities. The perspectives show what tasks you can set in order to implement additional aspects of decomposition and hierarchy in similar systems

Key words: AIS, IR, IS, decomposition, hierarchy, essence, system, subsystem, database, structure

References

- 1. Ersheeva R.M. "Analysis of requirements for the Automated Information System for assessing students' knowledge", *Young Scientist (Molodoy uchenyy)*, 2011, vol. 1, no. 11 (34), pp. 70-74, available at: https://moluch.ru/archive/34/3924/ (date of access: 05.08.2021).
- 2. Arseniev Yu.N. "Information systems and technologies" ("Informatsionnye sistemy i tekhnologii"), Moscow, UNITI-DAA, 2006.
- 3. Gagarina L.G. "Modern problems of informatics and computer technology" ("Sovremennye problemy informatiki i vychislitel'noy tekhniki"), Moscow, MIET, 2017, 204 p.
- 4. Kvach A.I., Chirkov A.V. "Comparison of solutions to automate the process of granting scholarships based on scientific achievements of students", *Postgraduate Student and Applicant (Aspirant i soiskatel')*, 2020, no. 6, pp. 22-25.
- 5. "Means of support for the formation and merging of meta descriptions of heterogeneous heterogeneous information resources", *Report on research (stage 2005-2006)/MOZNIT MIET*, sup. Chaplygin Yu.A., code 737-GB-Tselevye-RFBR-MOZNIT.
- 6. Ignatova I.G., Bobkova A.V., Pavlov A.Yu., Sokolova N.Yu., Shevnina Yu.S., Chaplygin A.Yu. "Formation and integration of meta descriptions of heterogeneous information resources to support the educational activities of the university", *New Educational Technologies at the University of Abstracts (Novye obrazovatel'nye tekhnologii v vuze tezisov dokladov)*, Ekaterinburg, UPI, 2005, pp. 240-241.
- 7. Kvach A.I., Chirkov A.V. "Optimization of costs and resources to ensure the work of the staff during SEO optimization", *Postgraduate Student and Applicant (Aspirant i soiskatel')*, 2021, no. 1, pp. 18-21.
- 8. Gagarina L.G. "Information technology in management" ("Informatsionnye tekhnologii v menedzhmente"), Moscow, MIET, 2015, 244 p.
- 9. Gagarina L.G., Garashchenko A.V., Ye K.Z., Dorogova E., Kochneva M. "Development of an approach to automatic test generation based on the graph model of a cache hierarchy", *Proc. of the 2020 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020*, pp. 1940-1944
- 10. Gagarina L.G., Kasimov R.A., Portnov E.M., Fedorov P.A., Aung Kyaw Myo "Development of methods to improve the efficiency of information transmission in mobile video streaming systems", *Proc. of the 2020 the 8th Int. Conf. on Control, Mechatronics and Automation*, pp. 232-236.

Submitted 17.06.2021; revised 23.08.2021

Information about the authors

Yuliya S. Shevnina, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, National Research University "MIET" (building 1 Shokin Square Zelenograd 124498, Moscow, Russia), e-mail: incos@miee.ru

Larisa G. Gagarina, Dr. Sc. (Technical), Professor, National Research University "MIET" (building 1 Shokin Square Zelenograd 124498, Moscow, Russia), e-mail: incos@miee.ru

Andrey V. Chirkov, graduate student, National Research University "MIET" (building 1 Shokin Square Zelenograd 124498, Moscow, Russia), e-mail: incos@miee.ru

Nikolay S. Mironov, graduate student, National Research University "MIET" (building 1 Shokin Square Zelenograd 124498, Moscow, Russia), e-mail: incos@miee.ru

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.008 УДК 628.171

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

В.В. Мокшин¹, А.В. Спиридонова², Г.В. Спиридонов¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия ²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Аннотация: рассматриваются математические и информационные методы эффективного прогнозирования потребления водных ресурсов. Произведены расчёты водопотребления по типовому административному зданию. Предложенные материалы представляют интерес для широкого круга специалистов, занимающихся разработкой экономико-математических моделей и повышением эффективности при планировании водных ресурсов в сфере жилищнокоммунального хозяйства. Прогнозирование осуществлялось с помощью регрессионных методов Forward Regression и Backward Elimination, включающих в себя как линейные, так и множественные нелинейные подходы анализа данных. Отдельное внимание было уделено сравнению действительных и прогнозируемых показаний. В ходе работы были выявлены наиболее релевантные алгоритмы, которые позволили произвести достаточно точную оценку водопотребления, что считается одной из основных задач водоснабжения и управления водопроводными сетями. В ходе исследования было установлено, что корректность прогнозируемых результатов в равной степени зависит как от количества исходных данных, на основе которых производится построение моделей, так и от количества дней, на которое производится прогнозирование. В случае выборки данных в 255 исходных и 116 прогнозируемых дней наиболее вероятные значения были получены регрессионными методами прямого и обратного отбора переменных. Проведённый анализ позволил указать причины появления ошибок при использовании данных методов. На основе достоверности расчётных показаний можно говорить о востребованности и пригодности изученных методов среди информационных систем на промышленных и жилищно-коммунальных объектах. Комплексный подход оптимизирует процесс планирования и повышает точность прогнозируемых значений суточного водопотребления в пределах жилищных микрорайонов, что сегодня является исключительно важным аспектом в сфере водоснабжения и управления водопроводными сетями

Ключевые слова: регрессия, прогнозирование, расчёт водопотребления, корреляция

Введение

Сегодня грамотное и эффективное управление водоснабжающими компаниями является одной из наиболее важных и в то же время непростых задач. В ходе работы сотрудники таких компаний сталкиваются с большим количеством проблем, среди которых особенно злободневными являются низкий уровень планирования потребления воды и нерелевантное прогнозирование расходов. Причинами неэффективного планирования и прогнозирования является устаревание существующих технических систем, отчасти - использование не в полной мере объёма информации и недостаточный общий уровень квалификации персонала предприятий. В связи с этим численное прогнозирование объёмов потребления воды становится исключительно важной задачей, позволяющей разрешить несколько проблем. В частности, качественное прогнозирование потребления будет являться основой для эффективного планирования подачи и распределения воды [1].

© Мокшин В.В., Спиридонова А.В., Спиридонов Г.В., 2021

Численное прогнозирование базируется на использовании математических методов с их последующей реализацией в различных информационных системах. Большое количество существующих и активно применяющихся сегодня методов прогнозирования описано в исследованиях В.Е. Снитюка [2]. Среди всех математических методов наиболее достоверными являются статистические методы, которые популярны во всех сферах жизни [3-5]. Можно выделить работу А.И. Новикова «Эконометрика», в которой приводится подробное описание проведения статистического анализа для динамических моделей и способов выявления тенденций [6]. Особую роль среди статистических методов играют методы корреляционного и регрессионного анализа. В частности, Э. Ферстер и Б. Ренц [7] рассматривают модели множественной регрессии. Данным моделям стоит отдать предпочтение при планировании и прогнозировании, так как они позволяют учесть все существенные факторы. Группой под руководством S.L. Zhoua было произведено прогнозирование потребления воды в Мельбурне (Австралия) на основе множественных

корреляций и автокорреляций [8]. Также зарубежными авторами приводится прогноз для потребления горячей воды на основе метода авторегрессии со скользящим средним, который также является корреляционным [9].

Прогнозирование потребления воды осуществлялось и другими методами. Например, G.Chen совместно со своей группой спрогнозировали потребление воды в городской местности с помощью так называемого метода «случайных лесов» [10]. А среди российских авторов В.М. Задачиным была разработана система водопотребления города на основе экстраполяции [11].

Базовым понятием в системе мероприятий является план, который рассматривается как вариант наиболее оптимального использования ресурсов предприятия, обеспечивающий достижение целей и выполнение задач производства. Основу прогнозирования составляет предвидение развития производства и нахожкоторые решений, обеспечивают наилучший вариант дальнейшей деятельности предприятия. Следует отметить, что в сферу ответственности любого водоснабжающего предприятия входит поставка воды потребителям, учёт потребления водных ресурсов, а также эксплуатация и надлежащее содержание водопроводной сети.

Принимая во внимание указанные обстоятельства, было решено рассмотреть несколько математических моделей анализа имеющихся данных и численного прогнозирования суточного водопотребления. При постановке задачи ключевым аспектом являлось выявление оптимального метода обработки большого количества данных с достаточной точностью для последующего использования полученных результатов для планирования водопотребления административным сектором.

В ходе построения моделей использовались статистические и корреляционные методы с возможностью автоматического расчёта в специализированных программах. Предлагаемые методы могут не только повысить эффективность прогнозирования объёмов водопотребления, но и за счёт грамотно спланированной подачи воды увеличить прибыль снабжающего предприятия.

Теория

Прогнозирование потребления водных ресурсов и определение наиболее подходящих методов для их включения в автоматизированную информационную систему осуществлялось на примере реальных данных водопотребления по городу Казани. В качестве исходных статистических данных были выбраны показания за период с 01.01.2019 по 31.12.2019 (366 значений). 250 показаний использовались в качестве базовых для построения прогноза, а по 116 оставшимся реальным показаниям производилось сравнение.

При анализе данных и составлении прогноза было решено придерживаться следующей методической конструкции:

- 1. Сбор статистических данных с мест учёта.
- 2. Проверка статистических данных на достоверность.
- 3. Расчёт статистических характеристик параметров.
- 4. Проведение парного корреляционного анализа.
- 5. Осуществление линейного и нелинейного регрессионного анализа данных методом прямого отбора переменных Forward Regression.
- 6. Осуществление линейного и нелинейного регрессионного анализа данных методом обратного отбора переменных Backward Elimination.
- 7. Формирование и анализ прогноза водопотребления.

В качестве объективных факторов объёма ежедневного потребления воды отдельным административным зданием были выбраны следующие величины:

- x_{l} среднее значение температуры воздуха (K);
- x_2 среднее значение атмосферного давления (мм.рт.ст.);
- x_3 среднее значение относительной влажности воздуха (%);
 - x_4 среднее значение скорости ветра (м/с);
 - x_5 уровень облачности (%);
- x_6 минимальное значение температуры воздуха за сутки (K);
- x_7 максимальное значение температуры воздуха за сутки (К);
 - x_8 количество осадков за сутки (мм);
 - x_9 длительность рабочего дня (ч).
- За результативный показатель принята переменная y суммарное водопотребление за сутки (M^3).

Для выяснения распределения переменных исходных статистических данных (ИСД) было необходимо оценить их основные статистические характеристики такие, как среднее значение, медиана, стандартное отклонение,

стандартная ошибка среднего, максимум и минимум переменных, асимметрия, стандартная ошибка асимметрии, эксцесс, средняя ошибка эксцесса, отношение стандартной ошибки среднего к среднему значению, разница между медианой и средним значением. Формулы, которые использовались для их расчёта, приведены ниже.

Среднее арифметическое значение:

$$\bar{v}_{j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} v_{ij}, \qquad (1)$$

где n — количество учитываемых временных интервалов;

m – количество изменяемых факторов;

k — количество результативных показателей состояния;

 v_{ij} — значение j—й переменной на i—м временном интервале;

 $\overline{v_j}$ — среднее арифметическое значение j—й переменной по n учитываемым интервалам времени; $i=\overline{1,m+k}$ — номер строки в таблице ИСД;

 $j=\overline{1,m+k}$ — номер столбца в таблице ИСД. Медиана:

$$P(V_i \le Me_i) = P(V_i > Me_i) = 0.5$$
. (2)

Стандартное отклонение:

$$\sigma_{j}^{*} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^{n} v_{ij}^{2} - (\sum_{i=1}^{n} v_{ij})^{2}}{n^{2}}}.$$
 (3)

Стандартная ошибка среднего:

$$S_j = \frac{\sigma_j^*}{\sqrt{n}}.$$
 (4)

Асимметрия:

$$a_{j} = \frac{n}{(n-1)\cdot(n-2)} \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{v_{ij} - \overline{v_{ij}}}{\sigma_{j}} \right]^{3}.$$
 (5)

Стандартная ошибка асимметрии:

$$S_{ac} = \sqrt{\frac{6(n-1)n}{(n-2)(n+1)(n+3)}}.$$
 (6)

Экспесс:

$$\vartheta_{j} = \left\{ \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{v_{ij} - \overline{v_{j}}}{\sigma_{j}} \right]^{4} \right\} -$$

$$-\frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}. (7)$$

Средняя ошибка эксцесса:

$$\sigma_{_{SKC}} = \sqrt{\frac{24n(n-1)^2}{(n-3)(n-2)(n+3)(n+5)}}.$$
 (8)

Отношение стандартной ошибки среднего к среднему значению:

$$\frac{S_j}{\overline{v_j}}$$
. (9)

Данные и методы

В табл. 1 приведены рассчитанные значения некоторых характеристик для показателя и факторов суточного потребления воды.

Таблица 1 Статистические параметры объективных переменных объёма ежедневного потребления воды отдельным административным зданием

	y	x_I	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	
Среднее значение	40,231	279,678	747,426	74,508	1,549	0,789	276,566	282,954	4,805	-	
Медиана	53,122	278,344	746,850	77,563	1,000	0,950	275,375	282,000	0,600	9,000	
Стандартное отклонение	24,410	10,652	6,818	13,705	0,781	0,304	9,584	12,140	12,253	-	
Стандартная ошибка среднего	1,276	0,557	0,356	0,716	0,041	0,016	0,501	0,635	0,640	0,220	
Минимум переменной	1,764	255,688	727,063	31,750	0,000	0,000	253,150	256,000	0,000	0,000 0,000	
Максимум переменной	79,504	299,725	771,838	96,250	5,000	1,000	294,900	306,600	179,000 9,000		
Асимметрия	-0,642	-0,088	0,400	-0,754	0,669	-0,390	-0,254	0,043	8,786 -0,763		
Эксцесс	-1,409	-0,938	0,773	-0,077	1,040	0,725	-0,665	-1,088	112,881	-1,426	
Отношение стандартной ошибки к среднему значению	0,607	0,038	0,009	0,184	0,504	0,385	0,035	0,043	2,550	0,691	

Продолжение табл. 1

Разница										
между ме-										
дианой и	12,891	1,334	0,576	3,055	0,549	0,161	1,191	0,954	4,205	2,904
средним										
значением										

После проверки ИСД на достоверность и расчёта статистических параметров основной задачей являлось выявление тесноты связи результативного показателя y с каждым отдельным объективным фактором x_i — проведение парного корреляционного анализа.

$$y = f(x_1, x_2, ... x_M), (10)$$

где M – количество объективных факторов.

Взаимосвязь переменных оценивалась по формуле парных коэффициентов линейной корреляции Пирсона:

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{g=1}^{n} v_{gi} v_{gj} - \frac{1}{n} \sum_{g=1}^{n} v_{gi} \cdot \frac{1}{n} \sum_{g=1}^{n} v_{gj}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{g=1}^{n} v_{gi}^{2} - \left(\frac{1}{n} \sum_{g=1}^{n} v_{gi}\right)^{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{n} \sum_{g=1}^{n} v_{gj}^{2} - \left(\frac{1}{n} \sum_{g=1}^{n} v_{gj}\right)^{2}\right)}}, (11)$$

где $_{V_{ig}}\left(_{V_{jg}}\right) -$ значение i-й (j-й) переменной на интервале g.

Для наглядности корреляционные зависимости между показателем и факторами водопотребления отображены в виде гистограммы на рис. 1.

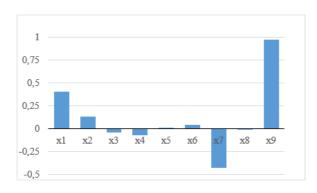


Рис. 1. Зависимость коэффициентов корреляции Пирсона между показателем y и факторами x_i

Все коэффициенты линейной корреляции лежат в интервале от -1 до +1. Если значение коэффициента близко к +1 или -1, то имеет место сильная, почти линейная, положительная или отрицательная зависимость между переменными. Если значение коэффициента близко к 0, то это означает, что переменные практически не зависят друг от друга.

Наиболее сильной оказалась парная корреляционная связь между показателем потребления воды и девятым фактором — типом дня недели. Влияние данного фактора составило 46% (см. рис. 2) с коэффициентом корреляции 0,981. Вторым по степени корреляционной связи с показателем водопотребления оказалось максимальное значение температуры воздуха за сутки x_7 , вклад которого составляет 20%, а коэффициент корреляции равен -0,426.

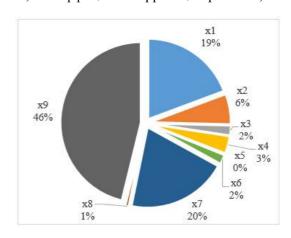


Рис. 2. Доля влияния соотвествующих факторов на водопотребление

Очень близкий по уровню значимости вклад с долей 19% вносит фактор x_1 - среднее значение температуры воздуха. Его парный коэффициент корреляции составил 0,407.

Остальные факторы, как видно из рис. 1 и рис. 2, не обладали существенной положительной и отрицательной связью с показателем суточного потребления воды.

На основе данных, полученных в результате корреляционного анализа, стало возможно установить регрессионные зависимости для показателей водопотребления. Построение моделей множественных регрессий осуществлялось с помощью пакета прикладных программ SPSS Statistic v26 [12].

Уравнения множественной регрессии для переменной у были получены двумя способами: методом прямого отбора переменных Forward Regression и методом обратного отбора переменных Backward Elimination.

Регрессионный анализ позволил исследовать влияние регрессоров (независимых переменных) на зависимую переменную *у*, основываясь на методе наименьших квадратов (МНК). МНК — это метод, требующий минимизации суммы квадратов отклонений искомых функций от имеющихся переменных.

$$\sum_{i=1}^{n} (y_{ij} - f_j(x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{im}))^2 \to \min \qquad (12)$$

$$j = \overline{1, k}$$

где y_{ij} – экспериментальное значение j–го показателя на і-м интервале времени;

 $f_i(x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{im})$ – значение j-го показателя состояния на і-м интервале времени, вычисленное по аппроксимирующей регрессионной зависимости;

m – количество факторов;

k — количество показателей.

В алгоритме метода прямого отбора переменных из списка регрессоров выбирался тот, который имеет наибольший коэффициент корреляции с зависимой переменной. Далее модель, состоящая из одного регрессора, проходила проверку на значимость при помощи Fкритерия Фишера. Если значимость модели не подтверждалась, то алгоритм прерывался из-за отсутствия входных переменных. В противном случае этот регрессор вводился в модель.

По всем оставшимся переменным на основании формулы (15) рассчитывалось значение у, а именно отношение прироста суммы квадратов SSR регрессии к сумме квадратов ошибок *MSE*.

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2,$$
 (13) где n – объем выборки;

 \hat{y}_i – оценка, полученная на основе регрессионной модели;

 \bar{y} – среднее всех наблюдений показателя.

$$MSE = \frac{SSR}{n-k-2} \,, \tag{14}$$

где n — объем выборки;

k – количество регрессоров исходной модели без учёта регрессора, проходящего проверку.

$$\gamma = \frac{SSR}{MSE} \,. \tag{15}$$

Далее из списка регрессоров заново выбирался тот, у которого оказывался наибольший критерий ү.

Выбранный таким образом регрессор также проверялся на значимость F-критерия Фишера. Если регрессор оказывался значимым, то он включался в модель, после чего осуществлялся возврат к пункту расчёта критерия у. Если значимость регрессора не подтверждалась, то алгоритм прерывался.

Итоговое регрессионное уравнение для показателя суточного водопотребления у, полученное методом прямого отбора, приняло следующий вид:

$$y = -38,509 + 5,541 \cdot x_7 + 0,159 \cdot x_9$$
. (16)

Таким образом, значимыми факторами оказались x_9 — длительность рабочего дня и x_7 — максимальное значение температуры воздуха за сутки.

Кроме того, в ходе работы был проведён множественный нелинейный регрессионный анализ методом прямого отбора переменных, в результате уравнение было дополнено квадратными членами:

$$y = -12,4846 + 0,6163 \cdot x_1^2 + +0,0003 \cdot x_7^2 - 0,0003 \cdot x_9^2.$$
 (17)

В данном случае наиболее существенными стали также факторы x_9 – длительность рабочего дня, x_7 — максимальное значение температуры воздуха за сутки и x_I – среднее значение температуры воздуха.

Алгоритм обратного отбора переменных был основан на противоположном подходе: в данном методе изначально в модель добавлялись все существующие регрессоры. Для каждого регрессора высчитывалась разность между получаемой суммой квадратов регрессии и показателем, рассчитанным без данного регрессора, для которого был вычислен показатель у.

Первым выбирался регрессор с наименьшим значением у. Данный регрессор проходил проверку на значимость. Если проверка была пройдена, то он удалялся из анализа и снова рассчитывалась разность без данного регрессора. Иначе алгоритм прерывался.

С помощью метода обратного отбора переменных было получено следующее регрессионное уравнение:

$$y = -31,781 - 0.04 \cdot x_1 - 0.145 \cdot x_7 + 5.545 \cdot x_9$$
. (18)

Как и в случае применения метода прямого отбора переменных, наиболее существенными оказались факторы x_1 , x_7 и x_9 .

При построении множественной нелинейной регрессии методом обратного отбора переменных регрессионное уравнение приняло следующий вид:

$$y = -16,3405 + 0,0003 \cdot x_7^2 + 0,616 \cdot x_9^2$$
. (19)

В соответствии с полученными регрессионными уравнениями стандартная ошибка оказалась равной 4,4474 м³ для линейной модели и 4,4196 м³ для нелинейной множественной модели алгоритма Forward Regression, 4,2212 м³ для линейной модели и 4,4473 м³ для нелинейной множественной модели алгоритма Васкward Elimination.

Полученные результаты

Реальные и спрогнозированные различными методами зависимости суточного водопотребления изображены на рис. 3.

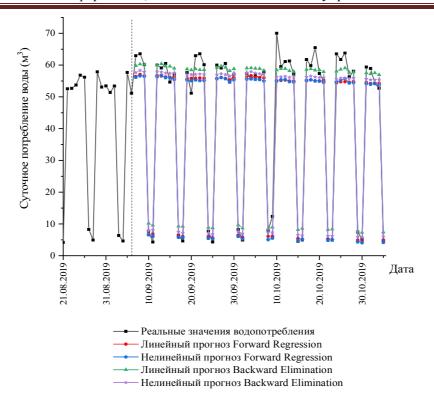


Рис. 3. Зависимости суточного потребления воды

Как можно видеть из рисунка, все предложенные регрессионные методы производят хороший количественный прогноз потребления воды в рамках соответствующих доверительных интервалов. Во всех алгоритмах явно прослеживаются периодические скачкообразные изменения в объёмах суточного потребления.

В табл. 2 приведены значения важных статистических характеристик таких, как R^2 – доля объяснённой дисперсии, отношение стандартной ошибки к среднему и значение F-фактора.

Для всех методов доля объяснённой дисперсии оказалась очень высокой, а ошибка прогнозирования составила всего 11%. При этом включение абсолютно всех факторов от x_1 до x_9 не позволит уточнить прогноз, так как в указанных методах регрессионный анализ основан на установлении наиболее сильной связи и проведении наиболее точных вычислений.

Таблица 2 Результативные статистические характеристики для соответствующих регрессионных алгоритмов

	1	1	
	R^2	$\frac{S_j}{\overline{v_j}}$	F
Прям. лин	0,96	0,02	3580
Прям. мн	0,95	0,02	2419
Обрат. лин	0,94	0,03	2416
Обратн. мн	0,97	0,02	3581

Заключение

Обобщая полученные результаты, стоит отметить, что качество спрогнозированных значений очень сильно зависит от исходной выборки, на основе которой производится само прогнозирование. Потребление воды в определённые дни может иметь случайный скачкообразный характер, для которого установить закономерность зависимости водопотребления от влияющих факторов намного сложнее [13-18]. Таким образом, логично предположить, что для каждой конкретной выборки любой из рассмотренных алгоритмов может оказаться более точным. В связи c этим целесообразность техникоэкономического подхода доказывает, предпочтительнее проводить анализ данных несколькими методами.

Значительно упростить процедуру прогнозирования может автоматизированная информационная система. На основе комплексной обработки данных информационной системой возможно формирование прогноза наиболее релевантным способом, расчёт которого принесёт экономический результат и небольшой срок окупаемости оборудования.

В условиях необходимости эффективного планирования и прогнозирования водопотребления современное программное обеспечение

позволит осуществить желаемую оценку, задействуя имеющиеся человеческие и технические ресурсы и существенно улучшая качество обработки информации.

Литература

- 1. Шушкевич Е.В. Эффективное управление системой подачи и распределения воды // Журнал ВСТ. 2011. Т. 1. С. 24-30
- 2. Снитюк В.Е. Прогнозирование. Модели, методы, алгоритмы. Киев: Маклаут, 2008. 367 с.
- 3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. М.: Вильямс, 2007. 912 с.
- 4. Радченко С.Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей: монография. Киев: Санспарель, 2005. 504 с.
- 5. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа: монография. Киев: Корнийчук, 2011. 376 с.
- 6. Новиков А.И. Эконометрика. М.: Инфра, 2007. 144 с.
- 7. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983. 304 с.
- 8. Forecasting daily urban water demand: a case study of melbourne / S.L. Zhoua, T.A. McMahon, A. Walton, J. Lewis // Hydrology, 2000. 236 (3). P. 153-164.
- 9. Lomet A., Suard Fr., Chèze D. Statistical modeling for real domestic hot water consumption forecasting // Energy Procedia, 2015. 70. C. 379-387.
- 10. Multiple random forests modelling for urban water consumption forecasting / G. Chen, T. Long, J. Xiong, Y.Bai // Water Resour. Manag., 2017. 31 (15). P. 4715-4729.
- 11. Задачин В.М. Система прогнозирования водопотребления города // Системи обробки інформації. 2010. Т. 7. № 88. С. 95-98.

- 12. Бююль А., Цёфель П. SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. СПб.: Диа-СофтЮП., 2005. 608 с.
- 13. Параллельный генетический алгоритм отбора значимых признаков в задаче формирования мероприятий для нефтяных скважин / И.М. Якимов, П.И. Тутубалин, В.А. Суздальцев, И.А. Зарайский, Э.Г. Тахавова // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям: тезисы. СПб., 2018. Т. 1. С. 720-723.
- 14. Кирпичников А.П., Сайфудинов И.Р., Мокшин В.В. Разработка комплекса программ для анализа технического состояния грузоподъемных механизмов // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 9. С. 112-116
- 15. Mokshin A.V., Mokshin V.V., Sharnin L.M. Adaptive genetic algorithms used to analyze behavior of complex system. Comm // Nonlinear Science and Num. Simulation. 2019. 71. P. 174-186.
- 16. Тутубалин П.И., Шафигуллин Р.Р., Моисеев В.С. Оптимизация состава вычислительного кластера мобильной распределенной интегрированной информационной системы // Вестник Казанского государственного технологического университета им. А.Н. Туполева. 2012. Т. 1. С. 120-128.
- 17. Мокшин В.В. Параллельный генетический алгоритм отбора значимых факторов, влияющих на эволюцию сложной системы // Вестник Казанского государственного технологического университета им. А.Н. Туполева. 2009. Т. 3. С. 89-93.
- 18. Parallel genetic algorithm of feature selection for complex system analysis IOP / I.R. Saifutdinov, L.M. Sharnin, V.V. Mokshin, M.V. Trusfus, P.I. Tutubalin // Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. 1096. 012089. DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012089

Поступила 21.04.2021; принята к публикации 23.08.2021

Информация об авторах

Мокшин Владимир Васильевич — канд. техн. наук, доцент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (420124, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Большая Красная, д. 55), e-mail: vladimir.mokshin@mail.ru

Спиридонова Ангелина Вячеславовна — магистр, Казанский (Приволжский) федеральный университет (420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18), e-mail: sav1998@list.ru

Спиридонов Григорий Вячеславович — аспирант, исследовательский Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева (420124, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Большая Красная, д. 55), e-mail: grish5991@gmail.com

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS AND ALGORYTHMS FOR THE WATER SOURCES CONSUMPTION PLANNING AND FORECASTING

V.V. Mokshin¹, A.V. Spiridonova², G.V. Spiridonov¹

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia ²Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract: this article discusses mathematical and informational methods for effective forecasting of water consumption. We calculated the water consumption for a typical administrative building. The materials proposed in the article are of interest to a wide range of specialists working on the development of economic and mathematical models and increasing the efficiency of housing and communal companies. We carried out the prediction using regression methods - Forward Regression and Backward Elimination, which include both linear and multiple nonlinear approaches to data analysis. We paid special attention to the comparison of actual and predicted readings. In the course of the work, we identified the most relevant algorithms, which allowed us to

make a fairly accurate assessment of water consumption, which is an extremely important aspect in the field of water supply and management of water supply networks. In the course of the study, we found that the correctness of the predicted results equally depends both on the amount of initial data, on the basis of which the models are built, and on the number of days for which the forecast is made. In the case of a sample of data of 255 baseline and 116 forecast days, we obtained the most probable values by regression methods of direct and inverse selection of variables. The analysis made it possible to indicate the reasons for the appearance of errors when using these methods. Based on the reliability of the calculated readings, we can talk about the relevance and suitability of the studied methods among information systems at industrial and housing and communal facilities. An integrated approach optimizes the planning process and increases the accuracy of the predicted values of daily water consumption within residential areas, which today is an extremely important aspect in the field of water supply and management of water supply networks

Key words: regression, forecasting, water sources consumption calculations, correlation

References

- 1. Shushkevich E.V. "Effective management of water supply and distribution", J. Water and Sanitation Equipment (Zhurnal VST), 2011, vol. 1, pp. 24-30
- 2. Snityuk V.E. "Forecasting. Models, methods, algorithms" ("Prognozirovanie. Modeli, metody, algoritmy"), Kiev, Macklaut, 2008, 367 p.
 - 3. Dreiper N., Smith G. "Applied regression analysis. Multiple regression", Moscow, Williams, 2007, 912 p.
- 4. Radchenko S.G. "Sustainable methods of statistical models' estimation" ("Ustoychivye metody otsenivaniya statisticheskikh modeley"), monograph, Kiev, Sansparel, 2005, 504 p.
- 5. Radchenko S.G. "Methodology of regression models" ("Metodologiya regressionnogo analiza"), monograph, Kiev, Khorniychuk, 2011, 376 p.
 - 6. Novikov A.I. "Econometry", Moscow, Infra, 2007, 144 p.
 - 7. Frester E., Renz B. "Methods of correlation and regression analysis", Moscow, Finansy i Statistika, 1983, 304 p.
- 8. Zhoua S.L., McMahon T.A., Walton A., Lewis J. "Forecasting daily urban water demand: a case study of Melbourne", *Hydrology J.*, 2000, no. 236 (3), pp. 153-164.
- 9. Lomet A., Suard Fr., Chèze D. "Statistical modeling for real domestic hot water consumption forecasting", *Energy Procedia*, 2015, no. 70, pp. 379-387.
- 10. Chen G., Long T., Xiong J., Bai Y. "Multiple random forests modelling for urban water consumption forecasting", *Water Resour. Manag.*, 2017, no. 31 (15), pp. 4715-4729.
- 11. Zadachin V.M. "System of the city water consumption forecasting", *Information Processing Systems (Sistemy obrobki informatsii)*, 2010, no. 7 (88), pp. 95-98
- 12. Bühl A., Zöfel P. "SPSS: the data processing skill. Analysis of the statistical data and restoration of hidden regularity", St. Petersburg, DiaSoftYuP, 2005, 608 p.
- 13. Yakimov I.M., Tutubalin P.I., Suzdaltsev V.A., Zarayskiy I.A., Takhavova E.G. "Parallel genetic algorithm of significant indicators selection in case of oil wells sessions planning", *Int. Conf. on the Soft Calculations and Measurements (Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam)*, St. Petersburg, 2018, vol. 1, pp. 720-723
- 14. Kirpichnikov A.P., Sayfutdinov I.R., Mokshin V.V. "The development of program complex for the weightlifting mechanisms analysis", *Technological University Bulletin (Vestnik Technologicheskogo Universiteta)*, 2017, no. 20 (9), pp. 112-116
- 15. Mokshin A.V., Mokshin V.V., Sharnin L.M. "Adaptive genetic algorithms used to analyze behavior of complex system", *Comm. in Nonlinear Science and Num. Simulation*, 2019, vol. 71, pp. 174-186.
- 16. Tutubalin P.I., Shafigullin R.R., Moiseev V.S. "The mobile disturbed integrated information systems compute clusters content optimization", *Kazan State Technological University named after A.N. Tupolev Bulletin (Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo technologicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva)*, 2012, vol. 1, pp. 120-128.
- 17. Mokshin V.V. "Parallel genetic algorithm of significant indicators selection affecting on the complex system evolution", Kazan State Technological University named after A.N. Tupolev Bulletin (Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo technologicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva), 2009, vol. 3, pp. 89-93.
- 18. Saifutdinov I.R., Sharnin L.M., Mokshin V.V., Trusfus M.V., Tutubalin P.I. "Parallel genetic algorithm of feature selection for complex system analysis", *IOP Conf. Series: Journal of Physics*, 2018, vol. 1096, pp. 012089, DOI: 10.1088/1742-6596/1096/1/012089

Submitted 21.04.2021; revised 23.08.2021

Information about the authors

Vladimir V. Mokshin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (55 Bol'shaya Krasnaya str., Kazan 420124, Republic of Tatarstan, Russia), e-mail: vladimir.mokshin@mail.ru

Angelina V. Spiridonova, MA, Kazan Federal University (420008, Russia, Republic of Tatarstan, Kazan, 18 Kremlyovskaya Street), e-mail: sav1998@list.ru

Grigoriy V. Spiridonov, graduate student, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (55 Bol'shaya Krasnaya str., Kazan 420124, Republic of Tatarstan, Russia), e-mail: grish5991@gmail.com

Радиотехника и связь

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.009 УДК 621.391

АНАЛИЗАТОР СИГНАЛОВ ZIGBEE

И.С. Фаустов¹, В.Б. Манелис¹, А.Б. Токарев^{1,2,3}, В.А. Козьмин¹, В.А. Сладких¹

¹Научно-производственная компания АО ИРКОС, г. Воронеж, Россия ²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия ³Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: широкое распространение беспроводных технологий требует развития средств контроля за устройствами и сетями передачи данных и, в частности, за беспроводными персональными сетями стандарта ZigBee. Известные способы поиска и приема сигналов ZigBee, требующие осуществления предварительной оценки частотного рассогласования, обладают высокой вычислительной сложностью. Некогерентный способ приема сигналов ZigBee не требует больших вычислительных ресурсов, но не обеспечивает удовлетворительную помехоустойчивость. Целью работы являлась разработка комбинированного алгоритма обнаружения и приема сигналов ZigBee. На основе разработанного алгоритма построен анализатор, позволяющий идентифицировать персональные сети, их передающее и приемное устройства. Новизна: для приёма сигналов при неизвестной частотной расстройке используется сочетание когерентной обработки на коротких временных интервалах с их последующим некогерентным накоплением. Предложенный алгоритм способен эффективно работать в неблагоприятных условиях приема и обладает относительно невысокой вычислительной сложностью. Результат: использование представленного решения позволяет выполнять обнаружение и прием сигналов ZigBee радиодоступных источников, идентифицировать персональную сеть, передающее и приемное устройства в этой сети. Практическая значимость: предложенный алгоритм может использоваться для построения анализатора сигналов ZigBee на программно-определяемом радиоприемном устройстве с полосой одновременной обработки сигналов от 2 МГц. Реализованный в универсальных цифровых радиоприемных устройствах семейства АРГАМАК алгоритм применяется в системах поиска и локализации несанкционированных источников радиоизлучений в контролируемых объектах

Ключевые слова: IEEE 802.15.4, ZigBee, WPAN, пассивный радиомониторинг, обнаружение сигнала, служебные параметры сигнала

Введение

В последнее время широкое распространение получили беспроводные персональные сети (WPAN – Wireless personal area network). Радиус действия таких сетей может варьироваться от нескольких десятков сантиметров до нескольких десятков метров. Беспроводные персональные сети могут быть развернуты с использованием различных сетевых технологий, среди которых одной из наиболее распространенных является ZigBee [1].

Технология ZigBee использует стандарт радиосвязи IEEE 802.15.4 [2], который описывает физический уровень (PHY – Physical Layer) и уровень доступа (MAC – Medium Access Layer). Стандарт IEEE 802.15.4 ориентирован на организацию WPAN с небольшими скоростями передачи данных и низким энергопотреблением при радиусе действия сетевых устройств до 75 м.

ZigBee обеспечивает возможность организа-

ции ячеистой топологии и широко используется для умных домов, измерительных приложений, умных городов, а также промышленной автоматизации и приложений обеспечения безопасности. К настоящему времени рынок ZigBee насчитывает сотни миллионов устройств.

Для планирования и эксплуатации систем ZigBee, проверки соответствия требований к параметрам передатчиков, контроля радиоизлучений в некоторых помещениях необходимо проводить обнаружение и анализ радиосигналов ZigBee. Оборудование для такого анализа выпускается ведущими мировыми производителями радиоэлектронной аппаратуры: компаниями Rohde & Schwarz (R&S FSQ-K70), Texas Instruments (CC2531EMK) и др.

В данной статье представлен российский анализатор сигналов ZigBee. Он предназначен для поиска и приема сигналов IEEE 802.15.4, их идентификации и оценки параметров.

Особенности технологии и структура сигнала ZigBee

Наибольшее распространение на физическом уровне в ZigBee получил частотный диапазон ISM

[©] Фаустов И.С., Манелис В.Б., Токарев А.Б., Козьмин В.А., Сладких В.А., 2021

(Industrial, Scientific, Medical) 2400-2483.5 МГц, в котором, как правило, используется офсетная модуляция O-QPSK [2, 3].

В этом диапазоне могут использоваться 16 каналов, центральные частоты которых определяются выражением

$$f_n = 2405 + 5 \cdot (n-11) \text{ M}\Gamma \text{II},$$
 (1)

где $n = \overline{11,26}$ — номер канала ZigBee. Максимальная скорость передачи данных в каждом канале составляет 250 кбит/с [2].

	4 байта	1 байт	7 бит	1 бит	521 байт		2 байта
	Преамбула	SFD	Длина	Резерв	Заголовок МАС- уровня	Данные	CRC
l.		оследова- ьность	Заголовок РНҮ- уровня		Поле данных МАС- уровня		

Рис. 1. Структура фрейма сигнала IEEE 802.15.4

Сигнал ZigBee структурирован во времени по фреймам, длительность которых варьируется от 352 до 4256 мкс. Структура фрейма показана на рис. 1.

Каждый фрейм начинается с преамбулы длительностью 8 символов, которая вместе с разделительным полем SFD (Start-of-Frame Delimiter) образует известную синхропоследовательность, используемую для обнаружения сигнала и его синхронизации [2,4]. Все биты преамбулы равны нулю. Общая длительность синхропоследовательности $T_{cunx} = 160 \, \mathrm{MKC}$. Заголовок физического уровня содержит информацию о длине поля данных МАС-уровня в байтах. Заголовок МАС-уровня включает порядковый номер данных, а также информацию, необходимую для идентификации сети, передающего и приемного устройств этой сети. В конце каждого фрейма присутствует два проверочных байта, сформированных по битам поля МАС-уровня с помощью полинома $G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ [2].

Стандарт IEEE 802.15.4 предполагает использование метода прямой последовательности для расширения спектра. Каждый передаваемый символ определяется чиповой последовательностью длиной 32. Возможны L=16 различных чиповых последовательностей, которые определяют 4 информационных бита. Сигнал чипов формируется с помощью полусинусоидальных импульсов [2]

$$g(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi t}{2T_C}\right), 0 \le t \le 2T_C; \\ 0, t < 0 \text{ } u\pi u \text{ } t > 2T_C. \end{cases}$$
 (2)

Входной для модулятора поток чипов, следующий со скоростью $1/T_C$ ($T_C=0.5\,\mathrm{MKC}$), разделяется на два потока b_I и b_Q , содержащих, соответственно, четные и нечетные чипы. Скорость этих потоков $1/2T_C$. В модуляторе формируется задержка нечетного чипового потока на интервал T_C по отношению к четному чиповому потоку. Сдвиг T_C между синфазной и квадратурной составляющими в совокупности с использованием полусинусоидальных импульсов (2) обеспечивает постоянство амплитуды сигнала O-QPSK [5].

В результате на выходе модулятора формируются синфазная и квадратурная компоненты комплексного сигнала O-QPSK [5,6]

$$I(t) = \sum_{m} b_{I}[m] \cdot g(t - 2T_{C}m), \qquad (3)$$

$$Q(t) = \sum_{m} b_{Q}[m] \cdot g(t - 2T_{C}m - T_{C}), \qquad (4)$$

где m — номер чипа в синфазном/квадратурном потоке. На рис. 2 показан пример синфазной и квадратурной компонент символа O-QPSK.

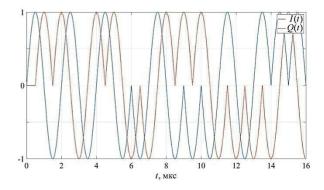


Рис. 2. Синфазная и квадратурная компоненты комплексного сигнала O-QPSK

Обнаружение и прием сигналов стандарта IEEE 802.15.4

Технология ZigBee ориентирована на разработку бюджетных сетевых беспроводных устройств, работающих от автономного питания. Нестабильность рабочей частоты при этом может достигать $4 \cdot 10^{-5}$ [2], что при работе в ISM диапазоне соответствует максимально возможному частотному рассогласованию $\Delta f = 99.2$ кГц. Поиск сигнала ZigBee осуществляется по

синхропоследовательности. Частотная расстройка накладывает ограничение обработки длительность когерентной синхропоследовательности. обнаружении большого интервала когерентного накопления будет иметь место существенно несинфазное квадратурных сложение компонент вследствие изменения принимаемого сигнала [7], что обусловит деградацию результата когерентного накопления. При небольшом интервале когерентного накопления максимум решающей функции оценки временного положения искомого сигнала становится менее выраженным, что негативно сказывается на помехоустойчивости процедуры обнаружения и частотно-временной синхронизации. Длительность когерентного накопления auпри максимальном частотном рассогласовании Δf может быть рассчитана из условия

$$2\pi \Delta f \tau < \pi . ag{5}$$

Из (5) находим $\tau_{\rm max}=5$ мкс. Этот интервал $\tau_{\rm max}$ заметно короче длительности синхропоследовательности $T_{\rm cunx}$, что не позволяет без адаптации к частотному сдвигу осуществлять когерентный прием всей синхропоследовательности сигнала ZigBee. Увеличение длительности когерентного накопления до $T_{\rm cunx}$ возможно только в случае использования 33 каналов, соответствующих различным частотным сдвигам, что влечет за собой многократное увеличение вычислительной сложности обработки.

В работе [8] для обеспечения высокой помехоустойчивости используется когерентный приём. Для этого осуществляется предварительная оценка частотного рассогласования, которая включает возведение отсчетов сигнала в четвертую степень с последующей обработкой, что заметно увеличивает вычислительную сложность алгоритма приёма и, кроме того, требует буферизации данных на время оценивания.

В качестве альтернативы перечисленным выше способам приёма в данной работе предлагается осуществлять обнаружение синхропоследовательности на основе когерентной обработки сигнала на коротких интервалах с последующим некогерентным накоплением результатов.

Исходными данными для обработки является комплексный видеосигнал x_i (i=0,1,2...) с частотой отсчетов $f_S=4$ МГц. Для временных позиций анализируемого временного интервала формируется решающая статистика

$$\Lambda_i = \sum_{k=0}^{K-1} \left| Y_{i,k} \right|,\tag{6}$$

где $K=T_{\rm cunx}$ / $\tau_{\rm \varphi}=40$ — количество блоков когерентного накопления, $Y_{i,k}$ — результат когерентной обработки отдельного блока синхропоследовательности:

$$Y_{i,k} = \sum_{m=0}^{M-1} x_{i+M \cdot k+m} \cdot r_{M \cdot k+m}^* , \qquad (7)$$

 r_j , $j=\overline{1,J}$ — отсчеты синхропоследовательности (опорный сигнал), $J=f_S\cdot T_{cunx}=640$ — длина синхропоследовательности в отсчетах, * — оператор взятия комплексно-сопряженного значения, $M=f_S\cdot au_\phi=16$ — длина блока когерентного накопления в отсчетах, соответствующая длительности $au_\phi=4$ мкс.

Сформированная статистика Λ_i сравнивается с порогом

$$\Lambda_{i} \geq h \sum_{j=0}^{J} \left| x_{i+j} \right|^{2}, \qquad (8)$$

где $h = 4 \div 6$ — нормированный порог.

Если значение статистики Λ_i не превышает порог на всем анализируемом интервале, выносится решение об отсутствии сигнала. Если для некоторого отсчета i_0 имеет место первое превышение порога, выносится решение о наличии сигнала. Далее на интервале $[i_0,i_0+J]$ находится положение i_{\max} максимума статистики Λ_i (6), которое полагается оценкой временного положения синхропоследовательности (начала фрейма сигнала ZigBee). Пример возможного изменения статистики Λ_i при отношении сигнал-шум SNR=0 в условиях отсутствия частотного рассогласования показан на рис. 3.

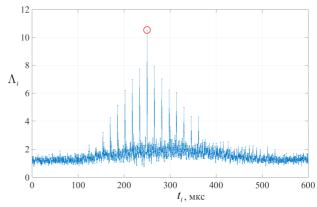


Рис. 3. Пример изменения решающей статистики Λ_i при поиске синхропоследовательности

Частотная расстройка оценивается по усредненной разности фаз результатов соседних блоков когерентного накопления [7]

$$\widehat{\Delta f} = \frac{1}{2\pi\tau_{\phi}} \arg\left(\sum_{k=2}^{K} Y_{i_{\text{max}},k} Y_{i_{\text{max}},k-1}^{*}\right),$$
(9)

где $arg(\cdot)$ – фаза комплексного числа, лежащая в пределах $\pm \pi$.

После установления частотно-временной синхронизации выполняется демодуляция символов заголовка физического уровня, из которого определяется длительность поля данных МАС-уровня.

Далее производится демодуляция символов поля данных МАС-уровня. По принятым битам этого поля циклическим кодером рассчитываются 16 проверочных бит. Они сравниваются с принятыми проверочными битами фрейма. Если хотя бы одна пара соответствующих бит не совпадает, принимается решение об ошибочном приеме фрейма. Если все соответствующие биты совпадают, принимается решение о безощибочном приеме фрейма и из бит заголовка МАС-уровня определяются тип фрейма, идентификаторы сети, отправителя и получателя.

При демодуляции произвольного n-го символа формируются корреляционные отклики для каждой из $l=\overline{0,L-1}$ возможных чиповых последовательностей

$$S_{n,l} = \sum_{i=0}^{Q-1} x_{i_{\max} + n \cdot Q + i} \cdot s_{l,i}^* \cdot e^{j2\pi \widehat{\Delta f} \cdot [Qn+i] + \varphi_n} , \qquad (10)$$

где $\mathbf{s}_{\mathbf{l},\mathbf{i}}^*$, $i=\overline{0,Q-1}$, — опорный сигнал символа, соответствующий l-й чиповой последовательности $l=\overline{0,L-1}$, $Q=32\cdot f_S\cdot T_C$ — количество отсчетов на интервале одного символа, $\varphi_n=\arg\left(S_{n-1,lmax_{n-1}}\right)$ — фазовое рассогласование на начало текущего символа, обусловленное частотным сдвигом.

Биты символа определяются по оценке передаваемой чиповой последовательности

$$lmax_n = \arg\max_{\ell} \left| S_{n,l} \right|, \quad l = \overline{0, L - 1} . \tag{11}$$

На рис. 4 для предложенного алгоритма приведены характеристики вероятности фреймовой ошибки P_E от отношения сигнал-шум при отсутствии частотной расстройки (0 Γ ц) и при её максимально возможном значении (100 к Γ ц).

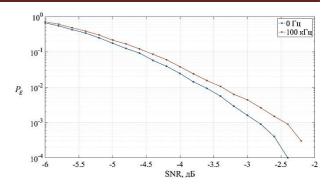


Рис. 4. Вероятность фреймовой ошибки сигналов ZigBee

Фрейм считался принятым с ошибкой как в случае пропуска сигнала при обнаружении, так и при ошибках демодуляции.

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет обнаруживать и принимать сигналы стандарта IEEE 802.15.4 (ZigBee) в условиях значительной нестабильности рабочей частоты (до $4 \cdot 10^{-5}$). Он обладает относительно невысокой вычислительной сложностью, поскольку не требует предварительной оценки частотного сдвига и связанной с этим буферизации данных. Предложенный алгоритм способен эффективно работать в неблагоприятных условиях приема. При отношении сигналшум минус 3,4 дБ вероятность фреймовой ошибки не превышает 10^{-2} . Он превосходит по помехоустойчивости известные некогерентные алгоритмы [9,10] более чем на 2 дБ.

Построенный на основе этого алгоритма анализатор способен обрабатывать сигналы ZigBee как на физическом уровне, так и MAC-уровне, что позволяет обнаруживать и идентифицировать персональную сеть (WPAN), а также передающее, приемное и другие устройства этой сети.

Литература

- 1. ZigBee Alliance, ZigBee Specification Document 07-5123r06, 2016.
- 2. IEEE Std. 802.15.4-2006, «Part 15.4: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)», 2006.
- 3. Salman N., Rasool I., Kemp A.H. Overview of the IEEE 802.15.4 standards family for low rate wireless personal area networks // Symposium on Wireless Communication Systems. 2010. P.701-705.
- 4. Farahani S. ZigBee Wireless Networks and Transceivers. Newnes/Elsevier, 2008. 339 p.
- 5. Švedek T., Herceg M., Matic T. A Simple Signal Shaper for GMSK/GFSK and MSK Modulator Based on Sigma-

Delta Look-up Table // Radioengineering. 2009. Vol. 18. No. 2. P. 230-237.

- 6. Kumar S., Majhi S. Blind Symbol Timing Offset Estimation for Offset-QPSK Modulated Signals // ETRI journal Wiley. 2019. P. 324-332.
- 7. Манелис В.Б. Оптимальная длительность когерентного накопления в задаче оценки частоты сигнала // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2003. №6. С. 45-50.
- 8. Reconfigurable dual mode IEEE 802.15.4 digital baseband receiver for diverse IoT applications/ M.A. Zubair, A.K.
- Nain, J. Bandaru, P. Rajalakshmi, U.B. Desai // 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT). 2016. P. 389-394.
- 9. A Robust Demodulator for OQPSK–DSSS/ S. Dai, H. Qian, K. Kang, W. Xiang // System Circuits, Systems, and Signal Processing. 2015. Vol. 34. P. 231-247.
- 10. Low-complexity SDR implementation of IEEE 802.15.4 (ZigBee) baseband transceiver on application specific processor/A. Ghazi, J. Boutellier, J. Hannuksela, O. Silvén, J. Janhunen // Wireless Innovation Forum Conference on Wireless Communications Technologies and Software Defined Radio. 2013.

Поступила 07.06.2021; принята к публикации 19.08.2021

Информация об авторах

Фаустов Иван Сергеевич – инженер-программист, научно-производственная компания АО ИРКОС (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б), e-mail: faustov.97@bk.ru

Манелис Владимир Борисович – д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, научно-производственная компания АО ИРКОС (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б), e-mail: vldman@mail.ru

Токарев Антон Борисович – д-р техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, научно-производственная компания АО ИРКОС (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б); профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); профессор кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29Б), e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru

Козьмин Владимир Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, директор по научной работе, научно-производственная компания АО ИРКОС (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б), e-mail: kv@ircoc.vrn.ru

Сладких Владимир Александрович – канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского сектора, научно-производственная компания АО ИРКОС (394049, Россия, г. Воронеж, Рабочий проспект, 101Б), e-mail: sladkihva@ircoc.vrn.ru

ZIGBEE SIGNALS ANALYZER

I.S. Faustov¹, V.B. Manelis¹, A.B. Tokarev^{1,2,3}, V.A. Koz'min¹, V.A. Sladkikh¹

¹«IRCOS» JSC, Voronezh, Russia ²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia ³International Institute of Computer Technology, Voronezh, Russia

Abstract: the widespread adoption of wireless technologies requires the development of controls over devices and data networks and in particular over ZigBee wireless personal networks. Known methods of searching for and receiving ZigBee signals, which require a preliminary assessment of frequency offset, have a high computational complexity. The non-coherent method of receiving ZigBee signals does not require large computing resources but does not provide satisfactory noise immunity. The purpose of the work was to develop a combined algorithm for detecting and receiving ZigBee signals. Based on the developed algorithm, we built an analyzer that allows you to identify personal networks, their transmitting and receiving devices. Novelty: to receive signals with an unknown frequency offset, we used a combination of coherent processing at short time intervals with their subsequent non coherent accumulation. The proposed algorithm is able to work effectively in unfavorable reception conditions and has a relatively low computational complexity. Result: the use of the presented solution allows you to detect and receive ZigBee signals from radio-accessible sources, identify a personal network, a transmitting and receiving device in this network Practical relevance: the proposed method can be used to build a ZigBee signal analyzer on an SDR with a band of simultaneous signal processing from 2 MHz. The ZigBee network analyzer, implemented on the basis of a digital radio receiver of the ARGAMAK family, serves as the basis for the device for searching and localizing unauthorized radio sources in controlled objects

Key words: IEEE 802.15.4, ZigBee, WPAN, passive radio monitoring, signal detection, service parameters of signals

References

- 1. ZigBee Alliance, ZigBee Specification Document 07-5123r06, 2016.
- 2. IEEE Std. 802.15.4-2006, "Part 15.4: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)", 2006.
- 3. Salman N., Rasool I., Kemp A.H. "Overview of the IEEE 802.15.4 standards family for low rate wireless personal area networks", *Symposium on Wireless Communication Systems*, 2010, pp.701-705.
 - 4. Farahani S. "ZigBee Wireless Networks and Transceivers", Newnes/Elsevier, 2008, 339 p.

Радиотехника и связь

- 5. Švedek T., Herceg M., Matic T. "A simple signal shaper for GMSK/GFSK and MSK modulator based on sigma-delta look-up table", *Radio Engineering*, 2009, vol. 18, no. 2, pp. 230-237.
- 6. Kumar S, Majhi S. "Blind symbol timing offset estimation for Offset-QPSK modulated signals", *ETRI journal Wiley*, 2019, pp. 324-332.
- 7. Manelis V.B. "Optimal duration of coherent accumulation in the signal frequency estimation problem", *News of Universities (Izvestiva vuzov)*, 2003, no. 6, pp. 45-50.
- 8. Zubair M.A., Nain A.K., Bandaru J., Rajalakshmi P., Desai U.B. "Reconfigurable dual mode IEEE 802.15.4 digital baseband receiver for diverse IoT applications", 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2016, pp. 389-394.
- 9. Dai S., Qian H., Kang K., Xiang W. "A robust demodulator for OQPSK-DSSS", System Circuits, Systems, and Signal Processing, 2015, vol. 34, pp. 231-247.
- 10. Ghazi A., Boutellier J., Hannuksela J., Silvén O., Janhunen J. "Low-complexity SDR implementation of IEEE 802.15.4 (ZigBee) baseband transceiver on application specific processor", Wireless Innovation Forum Conference on Wireless Communications Technologies and Software Defined Radio, 2013.

Submitted 07.06.2021; revised 19.08.2021

Information about the authors

Ivan S. Faustov, software engineer of the "IRCOS" JSC (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: faustov.97@bk.ru

Vladimir B. Manelis, Dr. Sc. (Technical), Leading Researcher of the "IRCOS" JSC (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: vldman@mail.ru

Anton B. Tokarev, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Professor, International Institute of Computer Technology (29B Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia); Senior Researcher at the Research sector of JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru

Vladimir A. Koz'min, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Director for scientific works of JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: kv@ircoc.vrn.ru

Vladimir A. Sladkikh, Cand. Sc. (Technical), Head of the Research Sector of JSC «IRCOS» (101B Rabochiy prospekt, Voronezh 394049, Russia), e-mail: sladkihva@ircoc.vrn.ru

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.010 УДК 621.396

ПОЛУВОЛНОВОЙ ДИПОЛЬ С АКТИВНЫМ РЕФЛЕКТОРОМ НА ОСНОВЕ ОПТОУПРАВЛЯЕМОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

Е.А. Ищенко¹, Ю.Г. Пастернак^{1,2}, В.А. Пендюрин³, С.М. Фёдоров^{1,4}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия ²ЗАО «ИРКОС», г. Москва, Россия

³АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия

⁴Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: для обеспечения радиосвязи применяются различные конструкции антенн, которые могут обладать всенаправленными или узконаправленными диаграммами направленности, при этом наибольшей защитой канала связи от помех и от перехвата обладают направленные антенны. Но их недостатком является то, что для обеспечения связи во всех направлениях требуется или установка группы антенн, или использование поворотных платформ, которые ухудшают показатели надежности системы, а также усложняют ее. Поэтому, как правило, для обеспечения связи применяют всенаправленные антенны, которые имеют диаграмму направленности в виде тороида. Недостатками таких антенн являются малый коэффициент направленного действия, а также прием большого числа шумов, что усложняет последующую обработку сигналов. Предлагается конструкция дипольной антенны, помещенной в активный метаматериал, с возможностью формирования луча путем коммутации слоев конструкции, что формирует динамически перестраиваемые рефлекторы. Получаемые в процессе функционирования системы диаграммы направленности обладают высокими значениями КНД, а также высокой помехозащищённостью и защитой от перехвата ввиду направленных свойств. Была получена конструкция антенны, помещенная в кубическую структуру активного метаматериала, с возможностью коммутации проводников с использованием ріп-диодов или МЭМС-коммутаторов, что позволяет обеспечить быстрое переключение режимов работы устройства, формирование направленного луча и обеспечение помехозащищенной и защищенной от перехвата связи

Ключевые слова: активный метаматериал, активный рефлектор, радиосвязь

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-57.2020.9

Введение

Антенны с активным управлением параметрами являются перспективными для внедрения в системах связи. В текущих реализациях известны несколько групп конструкций для антенн с активным управлением параметров. Разные виды конструкций применяются для достижения определенных характеристик системы.

Для обеспечения работы антенн в широкой полосе применяются активные цепи согласования, пример реализации таких антенных систем приводится в работах [1, 2]. Применение малошумящих усилителей позволяет обеспечить требуемый уровень возвратных потерь в широкой полосе частот, что позволяет реализовать сверхширокополосную связь на основе простых патч-антенн. Однако недостатками данных устройств являются их сложность, малая надежность и высокая стоимость реализации, однако данная возможность создания активных

антенн применяется в современных системах широкополосной связи.

Примером антенных систем с управлением характеристиками излучения выступают активные фазированные решетки, примеры которых приводятся в работах [3, 4]. В активных фазированных антенных решетках управление главным лепестком антенны происходит за счет изменения фазы приходящих сигналов, при этом удаётся достичь сканирования антенной в широком диапазоне углов. Главным недостатком активных фазированных решеток выступают их большие размеры, так как для управления характеристиками диаграммы направленности антенны требуется установка большого числа антенных элементов.

Другим примером управления характеристиками антенн с применением активных устройств может выступать волновод, интегрированный в диэлектрическую подложку [5], который позволяет достичь смещения фазы электромагнитных волн, а следовательно, и поворота направления главного лепестка диаграммы направленности. Благодаря такой кон-

© Ищенко Е.А., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Фёдоров С.М., 2021

струкции возможна реализация антенн миллиметрового диапазона с управлением характеристиками диаграммы направленности, при этом интеграция их в MIMO антенную решетку.

Для реализации антенны с несколькими характеристиками диаграммы направленности возможно формирование антенны, которая состоит из нескольких излучателей [6], которые поочередно включаются, что позволяет управлять видом диаграммы направленности. Однако у такой конструкции присутствует недостаток, который возникает вследствие использования сложной конструкции, которая состоит из нескольких слоев антенных элементов, поочередно включаемых. Также благодаря различным размерам антенных систем удается достичь управления характеристиками возвратных потерь, а следовательно, и шириной рабочей полосы частот.

Другим, одним из самых перспективных способов управления характеристиками излучателей выступают пассивные метаматериалы [7]. Применение резонансных метаматериалов позволяет расширить рабочий диапазон частот антенны, повысить ее эффективность, улучшить характеристики диаграммы направленности. Недостатками пассивных метаматериалов являются их узкопополосность, а также резонансная настройка для каждого применяемого антенного элемента.

В данной работе предлагается использовать широкополосный оптоуправляемый активный метаматериал [8], который позволяет осуществить управление характеристиками диаграммы направленности простейшей антенны полуволнового диполя. Применение предлагаемой конструкции позволяет реализовать активную антенну с управляемой диаграммой направленности, причем управление осуществляется путем выполнения электрической коммутации слоев, что позволяет повысить скорость работы устройства, добиться увеличения надежности конструкции. В данном случае полуволновой диполь выступает примером используемого излучателя, который может быть заменен на другой со всенаправленной диаграммой направленности, что возможно благодаря широкополосности применяемого метаматериала.

Конструкция антенны

Предлагаемая конструкция антенны состоит из двух компонентов: полуволнового диполя, который выступает в роли излучателя, помещается в кубическую структуру, выполненую из практически прозрачного материала — пенопласта с диэлектрической проницаемостью 1,1 (рис. 1).

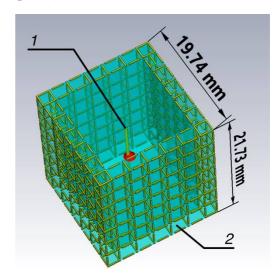


Рис. 1. Конструкция антенны с полуволновым диполем (1) и активным оптоуправляемым метаматериалом (2)

Метаматериал формируется на основе тонких металлических проводников, длина которых является кратной 1/8 или 1/16 длин волн, что позволяет обеспечить прозрачность конструкции при отсутствии коммутации слоев, а при наличии коммутаций возникают отражения от структуры метаматериала, что и позволяет реализовать активный рефлектор на основе оптоуправляемого метаматериала. Для рассматриваемой структуры длина медного проводника составляет 30/16 мм (что соответствует 1/16 λ для частоты 10 ГГц).

Управление коммутации слоев осуществляется за счет высокочастотных радиоэлектронных компонентов, которыми могут выступать ріп-диоды [9] или МЭМС-коммутаторы [10]. Применение современных радиоэлементов позволяет достичь высоких качественных характеристик в работе устройства — высокой изоляции при отключенном режиме, малого сопротивления при активации радиокомпонента. Радиокомпоненты помещаются между проводниками, которые формируют структуру метаматериала и активируются за счет световодов, которые подводятся к коммутирующему устройству.

Оптоуправляемый метаматериал имеет два слоя - внутренний и внешний, что позволяет помимо управления направлением излучения достичь управления коэффициентом направленного действия, а также шириной главного лепестка антенны. Особо важным является то, чтобы при отсутствии коммутаций слоев мета-

материала не оказывалось серьезных влияний на характеристики протекающих электромагнитных волн.

Важными преимуществами используемого оптоуправляемого метаматериала являются:

- 1) Универсальность, использование метаматериала возможно с любой антенной, которая может быть помещена в его конструкцию;
- 2) Широкополосность, которая позволяет обеспечить стабильные характеристики метаматериала в широком диапазоне частот;
- 3) Высокий КПД полученной антенны с оптоуправляемым метаматериалом;
- 4) Диэлектрическая прозрачность структуры при отсутствии коммутаций слоев.

Все вышеперечисленные свойства позволяют сделать вывод, что разработанная антенна обладает высокими характеристиками при простой конструкции.

Расчет диэлектрических параметров метаматериала

Так как конструкция метаматериала формируется на пенопласте, диэлектрическая проницаемость которого отлична от вакуума, требуется рассчитать основные диэлектрические параметры среды. Для определения основных характеристик воспользуемся методикой, которая описана в [11].

Предлагаемый метод основан на характеристиках матрицы рассеяния (S-параметров) для разомкнутого метаматериала. Волновое сопротивление метаматериала определяется в соответствии с формулой:

$$\eta_s = \pm \eta_0 \sqrt{\frac{(S_{11} + 1)^2 - S_{21}^2}{(S_{11} - 1)^2 - S_{21}^2}},\tag{1}$$

где S_{11} и S_{21} — соответствующие элементы матрицы рассеяния (S-параметров); η_0 – волновое сопротивление свободного пространства $\binom{\mu_0}{\varepsilon_0}$

Эффективное значение волнового сопротивления с учетом выражения (2):

$$Z_A = \frac{S_{21}(\eta_S + \eta_0)}{(\eta_S + \eta_0) - S_{11}(\eta_S - \eta_0)} \ . \tag{2}$$

Для определения волнового числа для данной среды воспользуемся следующим выражением:

$$k_s = \frac{1}{d} [-(Arg(Z_A) + 2p\pi) + j \cdot \ln(|Z_A|)], (3)$$

где р - выбор ветви значений (при расчетах p=1); d – толщина структуры (в данном случае рассматривается толщина стенки метаматериа-

Тогда относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости будут равны:

$$\mu_s(f) = \frac{k_s \cdot \eta_s}{2\pi f \cdot \mu_0} \tag{4}$$

$$\mu_{s}(f) = \frac{k_{s} \cdot \eta_{s}}{2\pi f \cdot \mu_{0}}$$

$$\varepsilon_{s}(f) = \frac{k_{s}}{2\pi f \cdot \varepsilon_{0} \cdot \eta_{s}}.$$

$$(4)$$

На основе приведенных выше уравнений были рассчитаны значения действительных и мнимых частей относительных магнитных и диэлектрических проницаемостей (рис. 2).

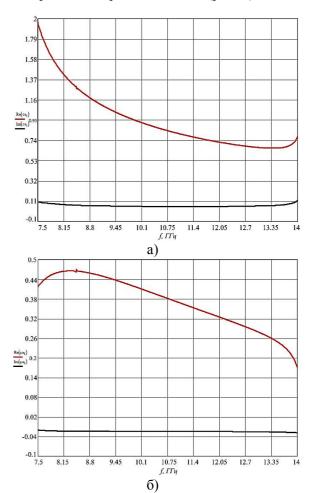


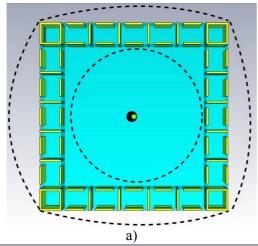
Рис. 2. Электрические параметры среды: а) относительная диэлектрическая проницаемость;

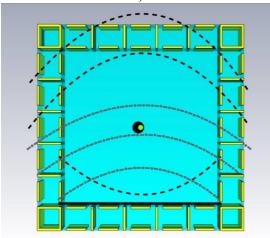
б) относительная магнитная проницаемость

Как видно по полученным результатам, разработанный метаматериал при отсутствии коммутаций не приводит к серьезным изменениям диэлектрических параметров среды в широком диапазоне частот, что позволяет сделать вывод о широкополосности и высоких качественных показателях разрабатываемого метаматериала.

Возможные виды коммутаций метаматериала

Оптоуправляемый метаматериал, в который помещается излучатель, позволяет обеспечить несколько режимов работы, которые приводятся на рис. 3.





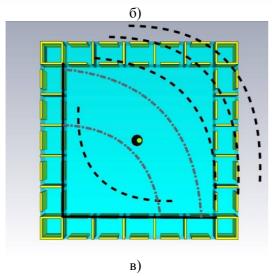


Рис. 3. Режимы работы оптоуправляемого метаматериала: а) режим прозрачности (нет коммутаций); б) коммутация одной стенки; в) коммутация двух стенок

Метаматериал позволяет обеспечить функционирование в нескольких режимах работы:

- 1) Режим прозрачности проявляется, когда отсутствуют коммутации слоев метаматериала, что позволяет обеспечить беспрепятственное прохождение электромагнитных волн через структуру, и диаграмма направленности практически не отличается от ДН излучателя, небольшие искажения вносят лишь узлы в углах электромагнитного кристалла, которые предназначены для увеличения жесткости конструкции. Теоретически ожидаемые направления протекания электромагнитных волн при таком режиме работы приводятся на рис. 3-а (черные пунктирные линии).
- 2) Коммутация одной стенки позволяет реализовать плоский рефлектор для антенны, что позволяет произвести фокусировку излучения в одном направлении, так, это позволяет повысить КНД антенны за счет фокусировки и обеспечить направленное излучение в направ-0°, 90°, 180°, 270°, соответственно, коммутация выполняется в направлении обратном целевому. На рис. 3-б показывается теоретически ожидаемое направление излучения, причем черными пунктирными линиями показывается первичное излучение от дипольной антенны, а серыми линиями с кружками - вторичное излучение, полученное в результате отражений, которое усиливает направленные характеристики системы.
- 3) Коммутация двух соседних стенок позволяет сформировать уголковый рефлектор, который обеспечивает направленное излучение в следующих направлениях: 45°, 135°, 225°, 315°. При выполнении такого вида коммутации происходит фокусировка излучения для диагонального излучения, при этом теоретически ожидаемое распространение первичных радиоволн от источника изображено черными линиями на рис. 3-в, а отражённые от метаматериала волны, усиливающие направленные свойства антенны, приводят к усилению направленных свойств антенны.

Таким образом видно, что применение метаматериала позволяет сформировать направленное излучение антенн в следующих направлениях: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°, что позволяет обеспечить направленную связь на основе простой всенаправленной антенны — полуволнового диполя. Наличие двух слоев позволяет обеспечить управление не только направлением излучения, но и шириной главного лепестка диаграммы направленности антенны.

На основе предложенной конструкции антенны возможна реализация направленной связи с малым уровнем излучения в обратном направлении, то есть с большим значением передне-заднего отношения.

Моделирование антенной системы

В процессе исследования выполнялось моделирование оптоуправляемого метаматериала, предназначенного для управления диаграммой направленности полуволнового диполя. Антенна представляет собой медный цилиндрический проводник диаметром 0,5 мм и длиной 13,9 мм. Как известно, простой полуволновой диполь имеет диаграмму направленности в форме тороида, что позволяет обеспечить всенаправленное излучение в горизонтальной плоскости. Для **управления** характеристиками направленности применялся активный метаматериал, который сформирован на основе пенопласта ПС-1, который обладает $\varepsilon = 1,1$ и $\mu = 1,$ что уменьшает влияние на характеристики протекающих радиоволн. Размер ячейки метаматериала 2,27х2,27 мм, а вся итоговая структура имеет размеры 19,7х19,7х21,7 мм, что позволяет полностью поместить полуволновой диполь внутрь конструкции. Произведем анализ влияния метаматериала на основные характеристики излучателя. На рис. 4 приводятся S_{11} параметры излучателя для ситуации, когда присутствует только полуволновой диполь и неактивный метаматериал.

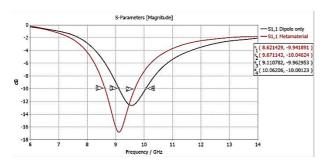


Рис. 4. S_{11} параметры антенны

Как видно по полученным результатам, ввиду того, что излучатель помещается в среду с диэлектрической проницаемостью отличной от 1, происходит смещение рабочего диапазона частот (по уровню -10 дБ) по частоте вниз, при этом уменьшается значение возвратных потерь, что приводит к повышению коэффициента полезного действия антенны (рис. 5) в рабочем диапазоне частот. Также применение оптоуправляемого метаматериала привело к небольшому расширению диапазона рабочих частот с 0,95 до 1,05 ГГц.

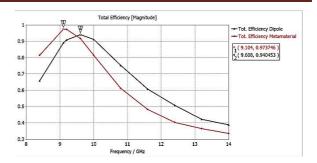


Рис. 5. Коэффициент полезного действия антенны

По полученным результатам видно, что при использовании метаматериала максимальное значение КПД выше, чем при использовании простой антенны, также наблюдается более резкий спад значений вне рабочего диапазона частот. Таким образом видно, что показатели эффективности антенны возросли при использовании оптоуправляемого метаматериала, при этом небольшое смещение рабочего диапазона частот вызвано тем, что диэлектрическая проницаемость материала исполнения структуры отлична от 1. Влияние метаматериала на характеристики диаграммы направленности были проверены на частоте 9,2 ГГц и приводятся на рис. 6.

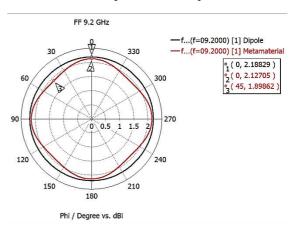


Рис. 6. Характеристики диаграммы направленности

Как видно, метаматериал вносит небольшие искажения на углах диаграммы направленности, что вызвано наличием ребер жесткости в углах структуры метаматериала.

Таким образом, можно сделать вывод, что оптоуправляемая структура активного метаматериала оказывает небольшое влияние на характеристики антенной системы, что позволяет применять структуры в прозрачном режиме для обеспечения всенаправленной связи.

Произведем анализ возможных случаев коммутации оптоуправляемого метаматериала и их влияния на формирование активного рефлектора антенны. В предлагаемой конструкции оптоуправляемого метаматериала реализуется

двухслойная структура, которая позволяет обеспечить коммутацию двух типов рефлекторов — внутреннего и внешнего. При этом коммутация возможна как одной стенки, так и уголка.

Рассмотрим ситуацию, когда выполняется коммутация внутреннего слоя метаматериала. Так структура, в которой формируются проводники с активными радиоэлементами, удалена от излучателя на 7,59 мм, что позволяет обеспечить лучшую фокусировку радиоволн и повысить стабильность картины диаграммы направленности. Рассмотрим картины электромагнитных полей, которые были получены в результате моделирования методом конечного интегрирования (на частоте f=9,104 ГГц), при этом убедимся, что вид распространения аналогичен теоретическим ожиданиям на рис. 4, полученные картины для односторонней коммутации приводятся на рис. 7а, для коммутации уголка на рис. 7б.

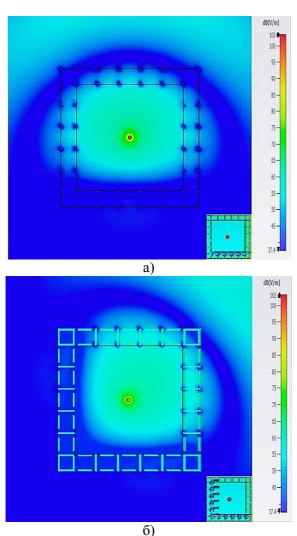


Рис. 7. Картины электромагнитных полей на частоте f=9,104 ГГц: а) формирование плоского рефлектора; б) формирование уголкового рефлектора

Как показывают результаты моделирования, теоретически ожидаемые направления излучения электромагнитных волн, которые приводились на рис. 3, совпадают с полученными. Для коммутации узлов метаматериала в процессе моделирования применялись Spice модели СВЧ pin-диодов. Произведем анализ картин диаграмм направленности антенны, которые были получены в результате моделирования, также стоит отметить, что ввиду симметричности структуры при аналогичных типах коммутаций других стенок метаматериала характеристики не изменяются, а лишь изменяется направление излучения. На рис. 8 приводятся диаграммы направленности антенны при исследовании формирования внутреннего рефлектора антенны в горизонтальной плоскости.

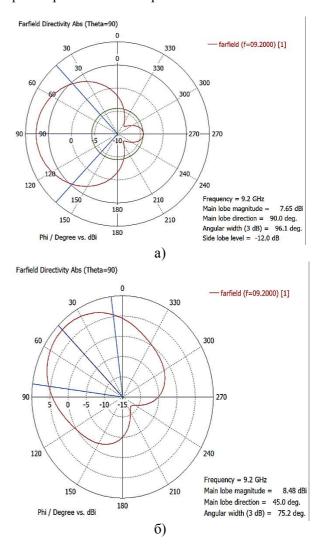


Рис. 8. Диаграммы направленности антенны на частоте f=9,2 ГГц: а) при формировании плоского рефлектора; б) формирование уголкового рефлектора

Как видно по полученным результатам моделирования, удается достичь поворота

главного лепестка излучения, причем углы поворота соответствуют ожидаемым направлениям излучения. Также благодаря широкополосности применяемого метаматериала управление диаграммой направленности возможно в диапазоне частот от 8,4 ГГц до 9,6 ГГц, причем рабочий диапазон ограничивается именно антенной, а сам метаматериал позволяет обеспечить работу и в более широком диапазоне частот. Для плоского рефлектора уровень передне/заднего отношения в рабочем диапазоне частот не ниже 9,5 дБ, для уголкового отражателя не менее 12 дБ. На рис. 9 приводятся все возможные виды направлений диаграммы направленности для внутреннего рефлектора, а в табл. 1 приводятся сводные характеристики диаграмм направленности антенны с активным внутренним рефлектором.

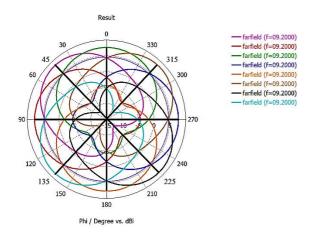


Рис. 9. Объединенные диаграммы направленности при коммутации внутренних слоев

Таблица 1 Характеристики диаграмм направленности при коммутации внутреннего слоя метаматериала, $f=9.2~\Gamma\Gamma$ ц

Тип рефлектора	Плоский	Уголковый
Направление излу-	0, 90, 180, 270	45, 135, 225,
чения, °	-,,,	315
КНД, дБ	7,65	8,48
Ширина главного		
лепестка по уров-	96,4	75,2
ню 3 дБ		
Передне/заднее	12	20,26
отношение, дБ	12	20,20
КПД, %	93	84

Как видно по полученным результатам, антенна обладает высокой эффективностью в исследуемом диапазоне частот, при этом обеспечивается точное направленное излучение, управление которым осуществляется за счет выполнения коммутаций метаматериала.

Так как метаматериал обладает двумя слоями, то произведем исследование характеристик диаграммы направленности антенны при коммутации внешнего слоя метаматериала. Наличие внешнего слоя позволяет управлять помимо направления излучения также и максимальным значением коэффициента направленного действия, шириной главного лепестка диаграммы направленности. Произведем анализ картины электромагнитного поля при различных видах коммутации полей – рис. 10.

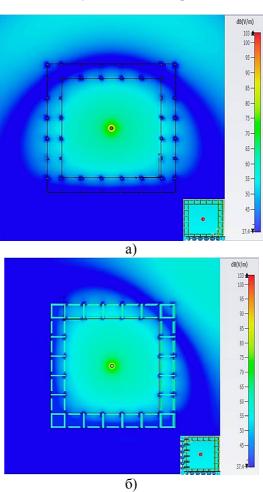


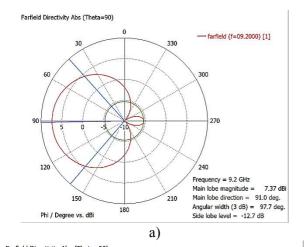
Рис. 10. Картины электромагнитных полей на частоте f=9,104 $\Gamma\Gamma_{\Pi}$:

- а) формирование плоского внешнего рефлектора;
- б) формирование внешнего уголкового рефлектора

Полученные картины показывают, что ожидаемый вид распространения электромагнитного поля подтвержден результатами моделирования, на рис. 11 приводятся диаграммы направленности полученной антенны с внешними рефлекторами.

Как видно по полученным картинам диаграмм направленности, применение внешнего слоя оптоуправляемого метаматериала позво-

ляет изменить КНД антенны, при этом происходит изменение ширины главного лепестка, также заметно отклонение главного лепестка при коммутации плоского рефлектора, что вызвано ребрами жесткости на углах метаматериала, однако отклонение мало и им можно пренебречь.



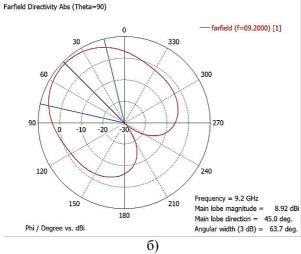


Рис. 11. Диаграммы направленности антенны на частоте f=9,2 $\Gamma\Gamma$ ц:

а) при формировании внешнего плоского рефлектора;б) формирование внешнего уголкового рефлектора

На рис. 12 приводятся все возможные картины диаграмм направленности, которые формируются в процессе коммутаций внешних рефлекторов антенны. Итоговые характеристики диаграмм направленности приводятся в табл. 2.

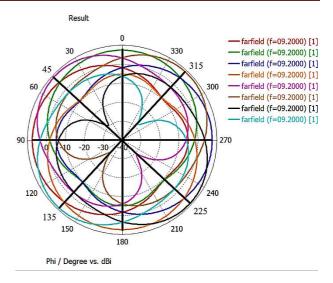


Рис. 12. Картины ДН, при использовании внешних рефлекторов

Таблица 2 Характеристики диаграмм направленности при коммутации внешнего слоя метаматериала,

	f=9,2 ГГц	•
Тип рефлектора	Плоский	Уголковый
Направление излу- чения, °	1, 91, 181, 271	45, 135, 225, 315
КНД, дБ	7,37	8,92
Ширина главного лепестка по уровню 3 дБ	97,7	63,7
Передне/заднее отношение, дБ	12,7	39,9
КПД, %	89,7	83

Как видно, полученная антенна позволяет обеспечить управление направлением излучения, а также за счет применения двухслойной активной структуры обеспечить управление характеристиками главного лепестка диаграммы направленности.

Заключение

В проведенном исследовании производилась разработка и моделирование дипольной антенны, интегрированной в оптоуправляемый метаматериал, который применяется для формирования рефлекторов. Благодаря применению высокочастотных коммутаторов удается достичь быстрого переключения характеристик антенны и обеспечить направленное излучение на углах 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 градусов. Применение предложенной конструкции антенны позволяет обеспечить направленную связь с высокой защитой от побочного излучения, которое негативно сказывается на помехозащищенности канала. В процессе исследова-

ния применялись методы моделирования, основанные на методе конечного интегрирования.

Предлагаемая конструкция антенны позволяет решить проблему с формированием направленного излучения, так как не требуется осуществлять механического вращения антенны, а только требуется обеспечивать переключение коммутирующих устройств, что позволяет повысить надежность и упростить конструкцию антенны.

Литература

- 1. Cho K., Hong S. Design of a VHF/UHF/L-Band Low-Power Active Antenna for Mobile Handsets // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2012. Vol. 11. pp. 45-48
- 2. Foroutan F., Nikolova N.K. UWB Active Antenna for Microwave Breast Imaging Sensing Arrays // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2019. Vol. 18. No. 10. pp. 1951-1955.
- 3. Yang G., Zhang Y., Zhang S. Wide-Band and Wide-Angle Scanning Phased Array Antenna for Mobile Communication System // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. 2021. Vol. 2. pp. 203-212.
- 4. Yasuzumi T., Kazama Y., Hashimoto O. Beam scanning characteristics of bi-layered patch antenna with slots having conical radiation pattern // 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI). 2011. pp. 3078-3081.
- 5. Ding Y.R., Jian Cheng Y. A Tri-Band Shared-Aperture Antenna for Wi-Fi MIMO and Beam-Scanning Wi-

- Gig Applications // 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting. 2019. pp. 1279-1280.
- 6. A New Corner-Reflector Antenna With Tunable Gain Based on Active Frequency Selective Surfaces/ G.H. Elzwawi, A. Kesavan, R. Alwahishi, T.A. Denidni // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. 2020. Vol. 1. pp. 88-94.
- 7. Review on Metamaterial Perfect Absorbers and Their Applications to IoT/M. Amiri, F. Tofigh, N. Shariati, J. Lipman, M. Abolhasan // IEEE Internet of Things Journal. 2021. Vol. 8. No. 6. pp. 4105-4131.
- 8. Использование активного метаматериала в качестве интегрированного в волновод фазовращателя/ Ю.Г. Пастернак, Е.А. Ищенко, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 1. С. 54-62
- 9. An Orbital Angular Momentum (OAM) Mode Reconfigurable Antenna for Channel Capacity Improvement and Digital Data Encoding/ B. Liu, G. Lin, Y. Cui *et al.* // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. No. 9852. P. 9.
- 10. Сысоева С. Высокочастотные МЭМС-ключи // Компоненты и технологии. 2011. №11. С. 29-36.
- 11.A Review of the Scattering-Parameter Extraction Method with Clarification of Ambiguity Issues in Relation to Metamaterial Homogenization/S. Arslanagić *et al.* // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2013. Vol. 55. No. 2. Pp. 91-106.
- 12. Peng P., Lixin G. A New Shooting Bouncing Ray Method for Composite Scattering from a Target above the Electrically Large Scope Sea Surface // Mathematical Problems in Engineering. 2017. Vol. 2017. Article ID 6201745. 7 p.

Поступила 25.05.2021; принята к публикации 20.08.2021

Информация об авторах

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

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84); ведущий инженер, ЗАО «ИРКОС» (129626, Россия, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternakyg@mail.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); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9027-6163

HALF-WAVE DIPOLE WITH AN ACTIVE REFLECTOR BASED ON OPTO-CONTROLLED METAMATERIAL

E.A. Ishchenko¹, Yu.G. Pasternak^{1,2}, V.A. Pendyurin³, S.M. Fyedorov^{1,4}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia ²JSC "IRKOS", Moscow, Russia

³Research and Production Enterprise "Automated Communication Systems", Voronezh, Russia ⁴International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: to ensure radio communication, various antenna designs are used, which can have omnidirectional or narrowly directional radiation patterns, while directional antennas have the greatest protection of the communication channel from interference and interception. However, their disadvantage is that to ensure communication in all directions, either the installation of a group of antennas or the use of turntables are required, which degrade the reliability of the system, as well as complicate it. Therefore, as a rule, to provide communication, omnidirectional antennas are used, which have a radiation pattern in the form of a toroid. The disadvantage of such antennas is, as a rule, a small directional coefficient, as well as the reception of a large number of noises, which complicates the subsequent signal processing. In this work, we propose a design of a dipole antenna placed in an active metamaterial with the possibility of forming a beam by switching the layers of the structure, which forms dynamically tunable reflectors. Directional patterns obtained in the course of system operation have high directivity values, as well as high noise immunity and protection against interception due to directional properties. As a result of the study, we obtained an antenna design, placed in a cubic structure of an active metamaterial with the possibility of switching conductors using pin diodes or MEMS switches, which allows for fast switching of device operating modes, formation of a directed beam and providing noise-immune and interception-proof communication

Key words: active metamaterial, active reflector, radio communication

Acknowledgments: this research was funded by the grant of the President of the Russian Federation for Young Scientists, the grant number MK-57.2020.9

References

- 1. Cho K., Hong S. "Design of a VHF/UHF/L-Band low-power active antenna for mobile handsets", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, vol. 11, pp. 45-48.
- 2. Foroutan F., Nikolova N.K. "UWB active antenna for microwave breast imaging sensing arrays", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, vol. 18, no. 10, pp. 1951-1955.
- 3. Yang G., Zhang Y., Zhang S. "Wide-band and wide-angle scanning phased array antenna for mobile communication system", *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2021, vol. 2, pp. 203-212.
- 4. Yasuzumi T., Kazama Y., Hashimoto O. "Beam scanning characteristics of bi-layered patch antenna with slots having conical radiation pattern", 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), 2011, pp. 3078-3081.
- 5. Ding Y.R., Jian Cheng Y. "A tri-band shared-aperture antenna for Wi-Fi MIMO and beam-scanning Wi-Gig applications", 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019, pp. 1279-1280.
- 6. Elzwawi G.H., Kesavan A., Alwahishi R., Denidni T.A. "A new corner-reflector antenna with tunable gain based on active frequency selective surfaces", *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2020, vol. 1, pp. 88-94.
- 7. Amiri M., Tofigh F., Shariati N., Lipman J., Abolhasan M. "Review on metamaterial perfect absorbers and their applications to IoT", *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, vol. 8, no. 6, pp. 4105-4131.
- 8. Pasternak Yu.G., Ishchenko E.A., Pendyurin V.A., Fyedorov S.M. "The use of an active metamaterial as a phase shifter integrated into the waveguide", *Papers of the Educational Institutions of Communication (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 54-62.
- 9. Liu B., Lin G., Cui Y. et al. "An orbital angular momentum (OAM) mode reconfigurable antenna for channel capacity improvement and digital data encoding" *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 9852, pp. 9.
- 10. Sysoeva S. "High-frequency MEMS keys" // Components and Technologies (Komponenty i tekhnologii), 2011, no. 11, p. 29-36.
- 11. Arslanagić S. et al. "A review of the scattering-parameter extraction method with clarification of ambiguity issues in relation to metamaterial homogenization", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2013, vol. 55, no. 2, pp. 91-106.
- 12. Peng P., Lixin G. "A new shooting bouncing ray method for composite scattering from a target above the electrically large scope sea surface", *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, vol. 2017, 7 p.

Submitted 25.05.2021; revised 20.08.2021

Information about the authors

Evgeniy A. Ishchenko, 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

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Leading Engineer of JSC "IRKOS" (21, Zvezdnyy avenue, Moscow 129626, Russia); e-mail: pasternakyg@mail.ru.

Vladimir A. Pendyurin, General Director, JSC RPE "Automated Communication Systems" (of. 415, 108 Peshe-Streletskaya str., Voronezh 394062, Russia), e-mail: 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), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9027-6163

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.011 УДК 621-391

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ СТАНЦИЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТАХ

Д.Г. Пантенков¹, В.П. Литвиненко²

¹АО «Кронштадт», г. Москва, Россия ²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: современные сложные радиотехнические комплексы и системы входят в состав ракетно-космических, авиационных, сухопутных, морских изделий, обеспечивающих решение задач повышения обороноспособности и безопасности РФ, а также отвечающих интересам гражданских потребителей. При этом на этапе проектирования радиотехнических комплексов и систем закладываются требуемые расчетные параметры по надежности, безопасности, долговечности, технологичности в целях обеспечения требуемого срока их эффективного функционирования для решения поставленных целевых задач. Рассмотрены результаты математического моделирования надежности проектируемых станций спутниковой связи на подвижных объектах (космические аппараты, беспилотные летательные аппараты, автомобили, железнодорожные поезда), которые отражают методический подход к определению надежности комплекса или системы верхнего уровня. Принципиальным моментом является возможность определения числовых значений данного показателя еще на этапе составления тактико-технических (технических) заданий на выполнение НИОКР, проведения аванпроекта, т.е. тех этапах работ, на которых цена ошибки не является существенной и имеется принципиальная возможность внести изменения в конструктивные и схемотехнические параметры разрабатываемых радиотехнических комплексов и систем

Ключевые слова: станция спутниковой связи, надежность, качество, наработка на отказ, среднее время восстановления, запасные части, инструменты и принадлежности, математическое моделирование, модель динамического процесса, расчёты

Введение

В работе [1] представлен математический аппарат определения надежности проектируемых станций спутниковой связи на подвижных объектах, который учитывает их специфику с учетом типа конкретных носителей и ряд основных параметров:

- среднее время работы между двумя соседними отказами T или средняя наработка на отказ T_0 :
 - среднее время восстановления Т_в;
 - коэффициент готовности изделия $\mathbf{K}_{\mathbf{r}}$.

При этом, как показано в [1-4], средняя наработка на отказ T_0 и среднее время восстановления $T_{\rm B}$ определяют основной показатель надёжности восстанавливаемых изделий (систем, блоков, устройств, плат и т.д.), которым является коэффициент готовности изделия $K_{\rm r}$.

Величина среднего времени восстановления $T_{\text{в}}$ представляет собой математическое ожидание продолжительности восстановления изделия после отказа, т.е. среднее время вынужденного, нерегламентированного простоя, вызванного отысканием причины и устранением отказа.

Следует отметить, что из трех взаимосвязанных показателей надёжности восстанавли-

ваемых изделий (**Кг**, **Тв и Т**₀) в требованиях задаются, как правило, только два из этих показателей, обосновывая это тем, что третий показатель находится в функциональной взаимосвязи и может быть определён по двум заданным показателям.

Цель данной статьи – получение количественных оценок надежности путем математического моделирования с использованием аналитических выражений, представленных в [1].

Оценка показателей надёжности станций спутниковой связи для высокоскоростных и командных радиолиний

Основными исходными данными для расчёта показателей надёжности изделий ССС являются ПН элементов (составных частей) изделия:

- средние наработки на отказ T_0 или интенсивности λ данных отказов;
- среднее время $T_{\text{в}}$ восстановления каждого і-го элемента, входящего в состав основного оборудования оцениваемого изделия;
- классификационная модель каждого элемента (резервированный или нерезервированный прибор, нагруженный или ненагруженный резерв, схема резервирования и др.);
- начальные запасы (при наличии всех перечисленных составных частей ССС согласно

-

конструкторской документации) в комплекте ЗИП

Средняя наработка на отказ для N однотипных элементов, имеющих результаты испытаний или эксплуатации, определена путём деления их суммарного времени исправной работы на общее число зафиксированных отказов. Например, общее время эксплуатации десяти делителей/сумматоров мощности составляет не менее 30 лет (255000 часов), и отказов этих устройств за время их эксплуатации не зафиксировано. Поэтому подтвержденная средняя наработка на отказ делителей/сумматоров составляет не менее 255000 часов.

Аналогичным образом можно показать, что остальные пассивные элементы изделия ССС (направленные ответвители, кабели, другие элементы) имеют среднюю наработку не менее 255000 часов, что соответствует их коэффициенту готовности, близкому к единице. Поэтому несущественным влиянием пассивных элементов на обобщённые показатели надёжности изделий ССС можно пренебречь.

Основные активные элементы изделий ССС, имеющие намного меньшую подтвержденную среднюю наработку на отказ по сравнению с пассивными элементами, должны иметь резервные устройства каждого типа в составе пополняемого комплекта ЗИП либо нагруженный резерв в составе резервированных систем 1:1, исходя из необходимости обеспечения надёжного функционирования изделия в течение сеанса связи согласно существующим требованиям [5-22].

Так, при определении показателей надёжности элементов антенной системы ССС учитывается, что опорно-поворотное устройство с зеркальной системой представляет собой, в основном, механические узлы, надёжность которых существенно выше надёжности электронных блоков и устройств. Однако на практике оценка показателей надёжности этих узлов расчётным методом, как правило, не осуществляется. Поэтому при оценке ПН принималось, что их вероятность безотказной работы, и соответственно коэффициент готовности, близки к единице ($\mathbf{K}_{\Gamma} \sim 1$).

При этом наименее надёжные элементы, состав которых определен изготовителем антенной системы, должны быть включены в состав комплекта ЗИП, а их реальная надёжность по данным завода-изготовителя будет учтена на последующих этапах расчётов, предусматриваемых программой обеспечения надёжности изделия ССС в целом.

Подготовленные исходные данные для расчета ПН изделий (перечни составных частей, средняя наработка на отказ T_i и среднее время восстановления τ_i каждого і-го элемента) заносятся в расчётную модель и приводятся в итоговой таблице вместе с результатами расчёта основных ПН изделия ССС в целом.

Расчёт ПН для каждой ССС ВРЛ и КРЛ (бортовая абонентская станция, подвижная центральная станция) выполнен методом перебора различных вариантов состава комплекта ЗИП с выполнением расчётов для каждого варианта. Перебор вариантов состава ЗИП выполнялся в автоматическом режиме и продолжался до получения такого состава ЗИП, который обеспечивает требуемое значение коэффициента готовности изделия в целом не ниже, например, 0,9975.

В качестве начального варианта для выполнения расчетов ПН изделий ССС целесообразно принять типовой вариант начальных объёмов запасов комплекта ЗИП, предлагаемых по результатам проектирования изделий согласно их спецификациям.

Определим сначала ПН антенных постов типа SOTM (бортовая спутниковая станция) с параметром 0,6 м и SNG (наземная спутниковая станция) с параметром 2,4 м, а затем создаваемых на их основе перспективных АЗС и ПЗС ВРЛ соответственно.

Результаты расчёта основных показателей надёжности земных станций спутниковой связи высокоскоростной и командной радиолиний

Результаты расчёта показателей надёжности антенного поста SOTM с параметром 0,6 м Кидиапазона частот при гарантированных запасах в комплекте ЗИП, нулевом времени логистической задержки на доставку исправного элемента органами снабжения по причине нахождения изделия не в полёте, а рядом с комплектом ЗИП (например, во время проведения ТО) представлены в табл. 1. Результаты расчёта с учётом логистической задержки, имитируемой время пребывания изделия ССС на маршруте полёта в течение 36 часов, представлены в табл. 2.

Вариант результатов расчёта ПОН антенного поста SOTM с параметром 0,6 м при ограниченных запасах ЗИП и времени доставки исправного элемента в течение 1 месяца представлен в табл. 3. Результаты расчёта ПОН антенного поста SNG с параметром 2,4 м для вариантов гарантированных и ограниченных запасов ЗИП представлены в табл. 4 и 5 соответственно.

Таблица 1 Результаты расчёта показателей надёжности АП SOTM с диаметром зеркала 0,6 м Ки-диапазона частот при неограниченных запасах в комплекте ЗИП и нахождении изделия вне штатного полёта

Оборудование	Кол-во в изд., n, шт.	$T_{\scriptscriptstyle m Bi}$,ч	Логистиче- ское время	Т ₀ ,ч	λ·n, 1/ч	Количе- ство в ЗИП., шт.	K_{Γ}	$\lambda_i \mathpunct{:} \tau_i$
АП SOTM 0,6 м								
Механические узлы АП, вклю- чая вращающиеся сочленения, к-т	1	3,0	0,2	50000	2·10 ⁻⁵	1	0,999936	0,000064
Привода с ШД осей УГМ и АЗ	2	0,5	0,2	30000	6,7·10 ⁻⁵	1	0,999953	0,000047
Привод с ШД подстройки поляризации	1	0,5	0,2	30000	3,3·10 ⁻⁵	1	0,999977	0,000023
Датчик нулевого положения по АЗ	1	0,5	0,2	100000	10 ⁻⁵	1	0,999993	0,000007
Концевые вы- ключатели (КВ) УГМ и POL	4	0,5	0,2	245000	1,6·10 ⁻⁵	1	0,999989	0,000011
ИТОГО:	•	•					•	0,000152

Результаты расчетов основных показателей надежности:

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00015).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99649).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99475).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9998).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (6834).
- 6. Среднее время восстановления, часов (1).

Таблица 2 ГМ с диаметром зеркала 0,6 м

Результаты расчёта показателей надёжности АП SOTM с диаметром зеркала 0,6 м Ки-диапазона частот при неограниченных запасах в комплекте ЗИП и логистической задержке на время пребывания изделия на маршруте полёта в течение 36 часов

Оборудование	Кол-во в изд., n, шт.	Т _{ві} ,ч	Логистическое время	Т ₀ ,ч	λ·n, 1/ч	Количество в ЗИП., шт.	K_{Γ}	λ_i · $ au_i$
АП SOTM 0,6 м								
Механические узлы АП, вклю- чая вращающиеся сочленения, к-т	1	3,0	36,0	50000	2·10 ⁻⁵	1	0,999221	0,000780
Привода с ШД осей УГМ и АЗ	2	0,5	0,2	30000	6,7·10 ⁻⁵	1	0,999953	0,000047
Привод с ШД подстройки поляризации	1	0,5	0,2	30000	3,3·10 ⁻⁵	1	0,999977	0,000023
Датчик нулевого положения по АЗ	1	0,5	0,2	100000	10 ⁻⁵	1	0,999993	0,000007
КВ УГМ и POL	4	0,5	0,2	245000	1,6.10-5	1	0,999989	0,000011
ИТОГО:		•			•			0,000868

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00015).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99649).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99475).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9991).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (6834).
- 6. Среднее время восстановления, часов (5,9).

Таблица 3

Результаты расчёта показателей надёжности антенного поста SOTM с диаметром зеркала $0.6\,\mathrm{M}$ Ки-диапазона частот при ограниченных запасах в комплекте ЗИП и логистической задержке на вре-

мя доставки исправного элемента органами снабжения 1 месяц

Оборудование	Кол-во в изд., n, шт.	Т _{ві} , ч	Логистическое время	Т ₀ , ч	λ·n, 1/ч	Количество в ЗИП., шт.	K_Γ	$\lambda_i \cdot au_i$	
АП SOTM 0,6 м	АП SOTM 0,6 м								
Механические узлы АП, включая вра- щающиеся сочле-	1	3,0	731,0	50000	2·10 ⁻⁵	1	0,985532	0,014680	
нения, к-т									
Привода с ШД осей УГМ и АЗ	2	0,5	0,2	30000	6,7·10 ⁻⁵	1	0,999953	0,000047	
Привод с ШД под- стройки поляриза- ции	1	0,5	0,2	30000	3,3·10 ⁻⁵	1	0,999977	0,000023	
Датчик нулевого положения по А3	1	0,5	0,2	100000	10 ⁻⁵	1	0,999993	0,000007	
КВ УГМ и POL	4	0,5	0,2	245000	1,6.10-5	1	0,999989	0,000011	
ИТОГО:	•	•		•			•	0,014768	

Результаты расчетов основных показателей надежности:

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00015).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99649).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99475).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9854).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (6834).
- 6. Среднее время восстановления, часов (101).

Таблица 4

Результаты расчёта ПН АП SNG с диаметром зеркала 2,4 м Ки-диапазона частот при неограниченных запасах в комплекте ЗИП

Оборудование	Кол-во в изд., n, шт.	Т _{ві} ,ч	Логистическое время	Т ₀ ,ч	λ·n, 1/ч	Количество в ЗИП., шт.	K_{Γ}	$\lambda_i \cdot au_i$
АП SNG 2,4 м								
Механические узлы АП SNG, к-т	1	3,0	731,0	50000	2.10-5	1	0,999936	0,000064
ШД привода АЗ с муфтой	1	0,5	0,2	30000	3,3·10 ⁻⁵	1	0,999977	0,000023
ШД привода УГМ с редуктором	1	0,5	0,2	30000	3,3·10 ⁻⁵	1	0,999977	0,000023
ШД привода под- стройки поляри- зации	1	0,5	0,2	30000	3,3·10 ⁻⁵	1	0,999977	0,000023
Датчики углового положения УГМ, A3 и POL	3	0,5	0,2	100000	3·10 ⁻⁵	1	0,999979	0,000021
КВ УГМ, АЗ и POL	6	0,5	0,2	245000	2,4·10 ⁻⁵	1	0,999983	0,000017
ИТОГО:			·					0,000172

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00017).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99582).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99374).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9998).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (5731).
- 6. Среднее время восстановления, часов (1).

В случае возникновения неисправности в оборудовании АЗС ВРЛ, созданной на базе АП SOTM 0,6 м, в период, когда АЗС находится не в штатном полёте, а на стоянке или при проведении технического обслуживания восстановление может начаться сразу же после её обнаружения (локализации) и наличии в комплекте ЗИП исправного прибора, необходимого для замены вышедшего из строя [10, 11, 16]. Результаты расчёта показателей надёжности АЗС для подобной ситуации при неограниченных запасах в комплекте ЗИП приведены в табл. 6.

Если АЗС ВРЛ находится в штатном режиме работы на маршруте полёта БЛА и в случае возникновения неисправности АЗС её восстановление начнётся только после завершения полёта. Максимальное время задержки отложенного ремонта равно времени полёта БЛА, которое может составить 36 часов. Результаты расчётов показателей надёжности АЗС на базе АП SOTM с параметром 0,6 м Ки-диапазона при гарантированных запасах в комплекте ЗИП для варианта возникновения неисправности в период нахождения АЗС в штатном режиме полёта до 36 часов представлены в табл. 7.

Таблица 5 Результаты расчёта ПН АП SNG с диаметром зеркала 2,4 м Ки-диапазона частот при ограниченных запасах в комплекте ЗИП

Оборудование	Кол-во в изд., n, шт.	Т _{ві} ,ч	Логистическое время	Т ₀ ,ч	λ·n, 1/ч	Количество в ЗИП., шт.	K_{Γ}	$\lambda_i \cdot au_i$
АП SNG 2,4 м								
Механические					5			
узлы АП SNG, к-т	1	3,0	731,0	50000	2·10 ⁻⁵	-	0,985532	0,014680
ШД привода АЗ с муфтой	1	0,5	0,2	30000	3,3·10 ⁻⁵	1	0,999977	0,000023
ШД привода								
УГМ с редук-	1	0,5	0,2	30000	$3,3\cdot10^{-5}$	1	0,999977	0,000023
тором								
ШД привода подстройки поляризации	1	0,5	0,2	30000	3,3·10 ⁻⁵	1	0,999977	0,000023
Датчики углового положения УГМ, АЗ и POL	3	0,5	0,2	100000	3·10 ⁻⁵	1	0,999979	0,000021
КВ УГМ, АЗ и POL	6	0,5	0,2	245000	2,4·10 ⁻⁵	1	0,999983	0,000017
ИТОГО:								0,014788

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00017).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99582).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99374).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9854).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (5731).
- 6. Среднее время восстановления, часов (84,8).

Таблица 6 Результаты расчёта показателей надёжности АЗС на базе АП SOTM с диаметром зеркала 0,6 м Ки-лиапазона частот при неограниченных запасах в комплекте ЗИП и нахожлении излелия на стоянке

ки-дианазона часто	г при неогр	аниче	нных запаса.	A B KUMIIJ	ICKIC SYII	ти нахожден	ии изделих	і на стоянко
Оборудование	Кол-во в изд., п, шт.	Т _{ві} ,ч	Логистиче- ское время	Т ₀ ,ч	λ·п, 1/ч	Количество в ЗИП., шт.	K_{Γ}	$\lambda_i {\cdot} \tau_i$
АП SOTM 0,6 м	1	3,0	0,4	6834	0,00015	1	0,9998	0,0001524
Оборудование СНА:								
Плата управления приводами антенны (PDU)	1	1,0	0,2	150000	2·10 ⁻⁶	1	0,999992	0,000008
Плата приемника сиг- нала наведения	1	0,5	0,2	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006
Делитель/ сумматор на два	1	0,5	0,2	250000	4,0.10-6	1	0,999997	0,000003
Радиочастотное и проч	ее оборудова	ние ЗС:						
LNB Ku-диапазона	1	0,5	0,2	140000	7,1.10-6	1	0,999995	0,000005
BUC Ки-диапазона	1	0,5	0,2	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006
Модем спутниковый ИСТАР	1	0,3	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999994	0,000006
Источник (блок) пи- тания ±24 В или ±48 В	1	0,3	0,2	35000	2,9·10 ⁻⁵	1	0,999986	0,000014
Преобразователь портов RS485/Ethernet	1	0,3	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999994	0,000006
итого:	•		•	•	•	•		0,000206

Результаты расчетов основных показателей надежности:

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00023).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99442).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99164).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9998).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (4290).
- 6. Среднее время восстановления, часов (0,9).

Таблица 7 Результаты расчёта ПН АЗС на базе АП SOTM с диаметром зеркала 0,6 м Ки-диапазона частот при неограниченных запасах в комплекте ЗИП и нахождении изделия в полёте до 36 часов

неограниченных запасах в комплекте зитт и нахождении изделия в полете до 30 часов										
Оборудование	Кол-во в изд., п, шт.	Т _{ві} , ч	Логистическое время	Т ₀ , ч	λ∙п, 1/ч	Количество в ЗИП., шт.	K_{Γ}	$\lambda_{i}\text{-}\tau_{i}$		
Антенный пост SOTM 0,6 м	1	3,0	36	6834	0,0015	1	0,9991	0,000868		
Оборудование СНА:										
Плата управления приводами антенны (PDU)	1	1,0	0,2	150000	6,7·10 ⁻⁶	1	0,999992	0,000008		
Плата приемника сигнала наведения	1	0,5	0,2	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006		
Делитель/ сумматор на два	1	0,5	0,2	250000	4,0.10-6	1	0,999997	0,000003		
Радиочастотное и про	чее оборудо	вание	3C:							
LNB Ku-диапазона	1	0,5	0,2	140000	7,1.10-6	1	0,999995	0,000005		
BUC Ки-диапазона	1	0,5	0,2	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006		
Модем спутниковый ИСТАР	1	0,3	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999994	0,000006		
Источник (блок) питания ±24 В или ±48 В	1	0,3	0,2	35000	2,9·10 ⁻⁵	1	0,999986	0,000014		
Преобразователь портов RS485/Ethernet	1	0,3	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999994	0,000006		
ИТОГО:	•							0,000922		

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00023).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99442).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99164).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9991).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (4290).
- 6. Среднее время восстановления, часов (4).

Таблица 8 Результаты расчёта ПН АЗС на базе АП SOTM с диаметром зеркала 0,6 м Ки-диапазона частот при ограниченных запасах в комплекте ЗИП

		h. 0. l	dim lemba sun	acan b no		J1111		
Оборудование	Кол-во в изд., п, шт.	Т _{ві} ,ч	Логистическое время	Т ₀ ,ч	λ·n, 1/ч	Количество в ЗИП., шт.	K_{Γ}	$\lambda_i {\cdot} \tau_i$
Антенный пост SOTM 0,6 м	1	3,0	0,4	6834	0,00015	1	0,9991	0,000868
Оборудование СНА:								
Плата управления приводами антенны (PDU)	1	1,0	1464,0	150000	6,7·10 ⁻⁶	-	0,990328	0,009767
Плата приемника сиг- нала наведения	1	0,5	0,2	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006
Делитель/ сумматор на два	1	0,5	0,2	250000	4,0.10-6	1	0,999997	0,000003
Радиочастотное и проч	ее оборудовані	ие ЗС:						
LNB Ku-диапазона	1	0,5	0,2	140000	$7,1\cdot10^{-6}$	1	0,999995	0,000005
BUC Ки-диапазона	1	0,5	0,2	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006
Модем спутниковый ИСТАР	1	0,3	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999994	0,000006
Источник (блок) питания ± 24 В или ± 48 В	1	0,3	0,2	35000	2,9·10 ⁻⁵	1	0,999986	0,000014
Преобразователь портов RS485/Ethernet	1	0,3	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999994	0,000006
итого:	•	<u> </u>		•	•			0,010681

Результаты расчетов основных показателей надежности:

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00023).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99442).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99164).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9894).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (4290).
- 6. Среднее время восстановления, часов (45,8).

Таблица 9 Результаты расчёта ПН ПЗС на базе АП SNG Ки-диапазона частот при неограниченных запасах

в комплекте ЗИП

Оборудование	Кол-во в изд., п, шт.	Т _{ві} ,ч	Логистическое время	Т ₀ ,ч	λ·n, 1/ч	Количество в ЗИП., шт.	K_{Γ}	$\lambda_i{\cdot}\tau_i$			
Антенный пост SNG	1	3,0	0,2	5731,0	1,7·10 ⁻⁴	1	0,999828	0,000172			
Оборудование СНА АП:	Оборудование СНА АП:										
Блок управления антенной БУА-Т	1	0,5	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999992	0,000008			
Блок управления приводами антенны БУПР-А	1	1,0	0,2	150000	6,7·10 ⁻⁶	1	0,999992	0,000008			
Приемник сигнала наведения ПСН-А	1	0,5	0,2	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006			
Блок распределительный	1	0,5	0,2	200000	5,0.10-6	1	0,999997	0,000004			
Делитель/ сумматор на два	2	0,5	0,2	250000	8,0.10-6	1	0,999994	0,000006			
Радиочастотное и прочее	оборудование З	C:									
LNB Ku-диапазона	1	0,5	0,2	140000	7,1.10-6	1	0,999995	0,000005			
BUC Ки-диапазона	1	0,5	0,2	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006			
Модем спутниковый ИСТАР	1	0,5	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999992	0,000008			
Блок питания LNB +18 B	1	0,5	0,2	35000	2,9·10 ⁻⁵	1	0,999980	0,000020			
Инжектор питания	1	0,5	0,2	180000	5,6·10 ⁻⁶	1	0,999996	0,000004			
Устройство местоопре- деления	1	0,5	0,2	120000	8,3·10-6	1	0,999994	0,000006			
Электронный компас	1	0,5	0,2	900000	1,1.10-6	1	0,999999	0,000001			
итого:								0,000081			

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00011).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99734).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99602).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9999).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (9026).
- 6. Среднее время восстановления, часов (0,7).

Таблица 10

Результаты расчёта ПН ПЗС на базе АП SNG Ки-диапазона частот при ограниченных запасах в комплекте ЗИП и логистической задержке 1 месяц

	1171	•	ин и логистич	conton su,	церине т	шеелц		
Оборудование	Кол-во в изд., n, шт.	Т _{ві} ,ч	Логистическое время	Т ₀ ,ч	λ∙п, 1/ч	Количество в ЗИП., шт.	K_{Γ}	$\lambda_i {\cdot} \tau_i$
Антенный пост SNG	1	3,0	0,2	5731,0	1,7·10 ⁻⁴	1	0,999828	0,000172
Оборудование СНА АГ	I:			<u> </u>				-
Блок управления ан- тенной БУА-Т	1	0,5	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999992	0,000008
Блок управления приводами антенны БУПР-А	1	1,0	0,2	150000	6,7·10 ⁻⁶	1	0,999992	0,000008
Приемник сигнала наведения ПСН-А	1	0,5	0,2	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006
Блок распределитель- ный	1	0,5	0,2	200000	5,0.10-6	1	0,999997	0,000004
Делитель/ сумматор на два	2	0,5	0,2	250000	8,0.10-6	1	0,999994	0,000006
Радиочастотное и проч	ее оборудо	вание	3C:					
LNB Ku-диапазона	1	0,5	0,2	140000	$7,1\cdot10^{-6}$	1	0,999995	0,000005
BUC Ки-диапазона	1	0,5	731,0	110000	9,1·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,006650
Модем спутниковый ИСТАР	1	0,5	0,2	90000	1,1.10-5	1	0,999992	0,000008
Блок питания LNB +18 B	1	0,5	0,2	35000	2,9·10 ⁻⁵	1	0,999980	0,000020
Инжектор питания	1	0,5	0,2	180000	5,6·10 ⁻⁶	1	0,999996	0,000004
Устройство место- определения	1	0,5	0,2	120000	8,3·10 ⁻⁶	1	0,999994	0,000006
Электронный компас	1	0,5	0,2	900000	1,1.10-6	1	0,999999	0,000001
ИТОГО:								0,006725

Результаты расчетов основных показателей надежности:

- 1. Суммарная интенсивность отказов, 1/час (0,00011).
- 2. Вероятность безотказной работы в течение суточного сеанса связи (0,99734).
- 3. Вероятность безотказной работы за цикл в течение 36 часов (0,99602).
- 4. Коэффициент готовности изделия с учетом комплекта ЗИП (0,9933).
- 5. Средняя наработка на отказ, часов (9026).
- 6. Среднее время восстановления, часов (60,7).

Заключение

В статье, состоящей из двух частей, представлен методический аппарат оценки показателей надёжности земных станций спутниковой связи, который представляет собой иерархическую структуру расчёта показателей надежности от отдельных компонент на уровне узлов и модулей до функционально законченных структурных блоков и составных частей комплекса ССС [1-3].

Комплексный анализ полученных результатов расчётов показателей надёжности антенного поста типа SOTM с диаметром зеркала 0,6 м при гарантированных запасах в комплекте ЗИП позволяет сделать следующие выводы.

1. Приведенный в колонке «Количество в ЗИП» табл. 1 и 6 состав комплекта ЗИП начального уровня (наличие всех перечисленных составных частей АП и абонентских земных станций в составе запасных частей комплекта ЗИП)

обеспечивает требуемую величину коэффициента готовности изделия не ниже 0,9998. При этом среднее время восстановления АП не более 1,0 час и АЗС в целом – не более 0,9 часа обеспечивается только при условии соблюдения указанных в таблицах времён восстановления составных частей изделия ССС, что потребует проведения регулярных тренировок эксплуатирующего персонала до приобретения устойчивых навыков по замене любой составной части АЗС.

2. Полученные результаты контрольных расчётов показателей надёжности для вариантов ограниченных запасов в комплекте ЗИП и с учётом логистической задержки доставки исправного элемента для замены вышедшего из строя в процессе эксплуатации изделия ССС показывают, что при отсутствии исправного блока для замены отказавшего, который может быть изготовлен и поставлен, например, в течение 1-го месяца, коэффициент готовности АЗС

в целом уменьшается с величины 0,9998 до величины 0,9894.

3. Среднее время восстановления изделий в составе АП, АЗС без учёта логистической задержки практически не изменяется, а с учётом среднего времени логистической задержки реальное среднее время восстановления изделия существенно увеличивается (до величины примерно 88,9 часов для АП при логистической задержке 1 месяц). При этом максимальное время неработоспособного состояния изделия ССС может достигать величины большей, чем продолжительность логистического времени доставки исправного устройства (от одного до трех месяцев и более).

Литература

- 1. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Методика определения надежности проектируемых станций спутниковой связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 3. С. 87-99.
- 2. Шубин Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 80 с.
- 3. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надёжность машин; под ред. проф. Д.Н. Решетова. М.: Высшая школа, 1988. 240 с.
- 4. Основы технического проектирования систем связи через ИСЗ / А.Д. Фортушенко, Ю.А. Афанасьев, М.В. Бродский и др.; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А.Д. Фортушенко. М.: Связь, 1972. 334 с.
- 5. Спутниковая связь и вещание: справочник. 3-е изд., перераб. и доп. / В.А. Бартенев, Г.В. Болотов, В.Л. Быков и др.; под ред. Л.Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997.528 с.
- 6. Упрощенный алгоритм построения вероятностной модели оценки степени рисков инновационных проектов / В.И. Великоиваненко, Н.В. Гусаков, Д.Г. Пантенков, В.М. Соколов // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 81-89.
- 7. Система спутниковой связи с последовательным зональным обслуживанием / В.И. Великоиваненко, Н.В. Гусаков, П.В. Донченко, А.А. Ломакин, Д.Г. Пантенков, В.М. Соколов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. №2 (75). С. 48-56.
- 8. Бернард Скляр. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение; 2-е изд., испр. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1106 с.
- 9. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: учеб. пособие. Таганрог: ТРТУ, 1997. Ч. 1. 95 с.
- 10. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой / Е.Ф. Камнев, В.Ю. Бобков и др. М.: Глобсатком, 2009. 724 с.
- 11. Федулин А.М., Садеков Р.Н. Алгоритм навигации беспилотных летательных аппаратов с учетом место-

- положения средств противовоздушной обороны // Известия института инженерной физики. 2020. №3 (57). С. 79-84
- 12. Руководство по авиационной электросвязи (РС ГА-99), утвержденное приказом ФСВТ России от 15.07.1999 г. № 14.
- 13. Правила применения антенн и фидерных устройств, утвержденные приказом Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации от «23» ноября 2006 г. № 153.
- 14. Правила применения земных станций спутниковой связи и вещания единой сети электросвязи Российской Федерации. Ч. І. Правила применения земных станций спутниковой связи, работающих через искусственные спутники Земли на геостационарной орбите, утвержденные приказом Министерства информационных технологий и связи РФ от «22» августа 2007 г. № 99.
- 15. Распоряжение Минтранса РФ от 22.08.2001 № НА-323-р "О допуске к эксплуатации в гражданской авиации авиационных станций спутниковой связи стандарта Inmarsat Mini-M AERO".
- 16. Федулин А.М., Никандров Г.В. Перспективы применения систем технического зрения для повышения автономности крупноразмерных беспилотных летательных аппаратов большой продолжительности полета // Роботизация Вооруженных Сил Российской Федерации: материалы конф., 2020. С. 58-65.
- 17. Бузов А.Л., Букашкин С.А. Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.
- 18. Пантенков Д.Г. Методический подход к интегральной оценке эффективности применения авиационных комплексов с БПЛА. Ч. 1. Методики оценки эффективности решения задач радиосвязи и дистанционного мониторинга // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 60-78.
- 19. Комплексная методика оценки экономической целесообразности проектирования космических аппаратов в целях решения разнородных технико-экономических задач / В.И. Великоиваненко, Д.Д. Кутоманова, Д.Г. Пантенков, О.П. Скоробогатов, Г.А. Тихов // Космонавтика и ракетостроение. 2020. № 3 (114). С. 38-48.
- 20. Пантенков Д.Г. Технические характеристики бортовых ретрансляторов космических аппаратов для обеспечения загоризонтной радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 5 (9). С. 58-74.
- 21. Пантенков Д.Г. Методика структурнопараметрической оптимизации целевой нагрузки космического аппарата в интересах решения разнородных частных целевых задач // Тезисы докладов XX научнотехнической конференции молодых ученых и специалистов ОАО «РКК «Энергия». Королёв, 2014. С. 290-291.
- 22. Опыт применения имитационного моделирования боевых действий на базе технологий виртуальной реальности для оценки наземных робототехнических комплексов военного назначения / И.В. Благодарящев, Е.А. Антохин, А.М. Федулин, В.А. Паничев // Робототехника и техническая кибернетика. 2019. Т. 7. № 2. С. 94-99.

Поступила 06.06.2021; принята к публикации 23.08.2021

Информация об авторах

Пантенков Дмитрий Геннадьевич – канд. техн. наук, заместитель главного конструктора по радиосвязи, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, д. 18, кор. 9), тел. 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru

Литвиненко Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: litvinvp@gmail.com

RESULTS OF MATHEMATICAL SIMULATION OF RELIABILITY OF PROJECTED SATELLITE COMMUNICATION STATIONS ON MOBILE OBJECTS

D.G. Pantenkov¹, V.P. Litvinenko²

¹"Kronstadt", Moscow, Russia ²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: modern complex radio communication and systems are part of rocket-space, aviation, dry-track, marine products that provide the solution of tasks both to increase the defense and safety of the Russian Federation and meet the interests of civilian consumers. At the same time, at the stage of design of radio engineering complexes and systems, the required design parameters for reliability, safety, durability, technological and technical support are laid in order to ensure the required period of their effective functioning to solve the set target tasks. This article considers the results of mathematical modeling of reliability of projected satellite communication stations on mobile objects (spacecraft, unmanned aerial vehicles, cars, railway trains), which reflect the methodological approach to determine the reliability of the complex or upper-level system. A fundamental point is the possibility of determining the numerical values of this indicator even at the stage of compiling tactical and technical (technical) tasks for R&D, conducting an advance project, i.e. those stages of work at which the error price is not significant and there is a fundamental possibility to make changes to the design and schematic parameters of the developed radio systems and systems

Key words: station satellite communication, reliability, quality, time between failures, average recovery time, spare parts, tools and accessories, mathematical modeling, dynamic process model, calculations

References

- 1. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. "Method of determining the reliability of projected satellite communication stations", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*), 2021, vol.17, no. 3, pp. 87-99.
- 2. Shubin R.A. "Reliability of technical systems and manufactured risk" ("Nadozhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk"), textbook, Tambov, TSTU, 2012, 80 p.
- 3. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z. "Reliability of machines" ("Nadozhnost' mashin"), Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 240 p.
- 4. Fortushenko A.D. "Fundamentals of technical design of communication systems via ISS" ("Osnovy tekhnicheskogo proektirovaniya sistem svyazi cherez ISZ"), Moscow, Svyaz', 1972.
- 5. Bartenev V.A., Bolotov G.V., Bykov V.L. et al. "Satellite communications and broadcasting" ("Sputnikovaya svyaz' i veshchanie"), reference book, Moscow, Radio I svyaz', 1997, 528 p.
- 6. Velikoivanenko V.I., Gusakov N.V., Pantenkov D.G., Sokolov V.M. "Simplified algorithm for constructing a probability model for assessing the degree of risk of innovative projects", *Space Devices and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, July-September 2014, no. 3(6), pp. 81-89.
- 7. Velikoivanenko V.I., Gusakov N.V., Donchenko P.V., Lomakin A.A., Pantenkov D.G., Sokolov V.M. "Satellite communication system with serial zone maintenance", *Cosmonautics and Rocket Engineering (Kosmonavtika i raketostroenie)*, 2014, no. 2 (75), pp. 48-56.
 - 8. Sklar B. "Digital communications. Theoretical foundations and practical application", Moscow, Williams, 2003, 1106 p.
- 9. Dyatlov A.P. "Satellite communication systems with mobile objects" ("Sistemy sputnikovoy svyazi s podvizhnymi ob"ektami"), textbook, Taganrog, TSTU, 1997, 95 p.
- 10. Kamnev E.F., Bobkov V.Yu. et al. "Satellite communication systems with elliptical orbits, branch separation and adaptive processing" ("Sistemy sputnikovoy svyazi s ellipticheskimi orbitami, razneseniem vetvey i adaptivnoy obrabotkoy"), Moscow, Globosatkom, 2009, 724 p.
- 11. Fedulin A.M., Sadekov R.N. "Algorithm for navigation of unmanned aerial vehicles, taking into account the location of air defense equipment", *News of Institute of Engineering Physics (Izvestiya instituta inzhenernoy fiziki)*, 2020, no. 3 (57), pp. 79-84.
- 12. "Manual on Aviation Telecommunication (RS GA-99)", approved by Order of the Federal Security Service of Russia dated
- 13. "Rules for the use of antennas and feeder devices", approved by Order of the Ministry of Information Technologies and Communications of the Russian Federation dated November 23, 2006 no. 153.
- 14. "Rules of application of terrestrial stations of satellite communication and broadcasting of the unified telecommunication network of the Russian Federation. Part I. Rules for the use of Earth satellite communication stations operating through artificial Earth satellites in geostationary orbit", approved by order of the Ministry of Information Technologies and Communications of the Russian Federation dated August 22, 2007 no. 99.
- 15. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 22.08.2001 No. NA-323-r "On admission to operation in civil aviation of Inmarsat Mini-M AERO standard satellite communication stations"

- 16. Fedulin A.M., Nikandrov G.V. "Prospects for the use of vision systems to increase the autonomy of large-sized unmanned aerial vehicles of long flight duration", *Proc. of the Conf.: Robotization of the Armed Forces of the Russian Federation (Robotizatsi-ya Vooruzhennykh Sil Rossiyskoy Federatsii)*, 2020, pp. 58-65.
- 17. Buzov A.L., Bukashkin S.A. "Special radio communication. Development and modernization of equipment and facilities" ("Spetsial'naya radiosvyaz'. Razvitie i modernizatsiya oborudovaniya i ob"ektov"), Moscow, Radiotehknika, 2017, 448 p.
- 18. Pantenkov D.G. "Methodological approach to integral evaluation of the effectiveness of using aircraft systems with UAVs. Part 1. Methods for assessing the effectiveness of solving problems of radio communication and remote monitoring", *Works of Educational Institutions of Communication (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2020, vol. 6, no. 2, pp. 60-78.
- 19. Velikoivanenko V.I., Kutomanova D.D., Pantenkov D.G., Skorobogatov O.P., Tikhov G.A. "Comprehensive methodology for assessing the economic feasibility of designing spacecraft in order to solve heterogeneous technical and economic problems", *Cosmonautics and Rocket Engineering (Kosmonavtika i raketostroenie)*, 2020, no. 3 (114), pp. 38-48.
- 20. Pantenkov D.G. "Technical specifications of on-board spacecraft repeaters for off-horizon radio communication with unmanned aerial vehicles", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2020, Vol. 84, no. 5 (9), pp. 58-74.
- 21. Pantenkov D.G. "Methodology of structural-parametric optimization of the target load of the spacecraft in the interests of solving heterogeneous private target problems", *Proc. of the XX Scientific and Technical Conf. of Young Scientists and Specialists of RSC Energia OJSC (Trudy XX nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov OAO «RKK «Energiya»)*, Korolev, 2014, pp. 290-291.
- 22. Blagodaryaschev I.V., Antokhin E.A., Fedulin A.M., Panichev V.A. "Experience in the use of simulation of military operations based on virtual reality technologies to evaluate ground-based robotic complexes for military purposes", *Robotics and Technical Cybernetics (Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika)*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 94-99.

Submitted 06.06.2021; revised 23.08.2021

Information about the authors

Dmitriy G. Pantenkov, Cand. Sc. (Technical), Deputy chief designer of radio communication systems, Kronstadt (18 prospect Andropova, Moscow 115432, Russia), e-mail: pantenkov88@mail.ru, tel. +7(926)109-23-95

Vladimir P. Litvinenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.012 УДК 621.391

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЕМНИКА С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИЕЙ РЕШАЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ПОРОГОВОГО УСТРОЙСТВА

М.Ф. Волобуев, В.С. Костенников, А.О. Шмойлов

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

Аннотация: разработана математическая модель двухканального корреляционного приемника радиосигналов с кусочно-линейной аппроксимацией, решающей функции порогового устройства. Приемник рассчитан на прием наиболее часто встречающихся на практике сигналов со случайной начальной фазой в условиях белого гауссовского шума. В синтезированной математической модели применяется кусочно-линейная аппроксимация решающей функции порогового устройства. Проведен сравнительный анализ характеристик обнаружения радиосигналов со случайной начальной фазой от отношения сигнал/шум, посчитанных с использованием разработанной математической модели корреляционного приемника с кусочно-линейной решающей функцией порогового устройства. Представлены полученные в результате математического моделирования процесса функционирования корреляционного приемника при обнаружении сигналов со случайной начальной фазой в условиях шума зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум. Показано, что результаты имитационного моделирования согласуются с теоретическими расчетами. Выявлено, что представление решающих функций пороговых устройств в классической теории обнаружения сигналов в виде идеализированных (оптимальных), которые не учитывают их нелинейность, приводят либо к увеличению вероятности ложной тревоги, либо к уменьшению вероятности правильного обнаружения, что приводит к ошибкам первого рода

Ключевые слова: математическая модель, обнаружение сигналов, решающая функция, пороговое устройство, имитационное моделирование

Введение

Анализ работ, направленных на решение задач обнаружения радиосигналов, согласно классической теории обнаружения, показывает, что при реализации пороговых устройств, которые входят в состав большинства обнаружителей, в них закладывается оптимальная решающая функция, имеющая бинарный характер [1]. Но в реальных условиях приема и при воздействии внутренних шумов аппаратуры переход из устойчивых состояний решающего устройства можно описывать не только ступенчатыми решающими функциями, но и нелинейными, которые принимают любое из значений от 0 до 1.

В настоящее время разработка пороговых устройств основана на использовании современных ТТЛ и КМОП технологий. Одним из основополагающих элементов пороговых устройств является операционный усилитель, с помощью которого реализуют компараторы, триггеры Шмитта, детекторы и т.д. Как известно, ни один операционный усилитель не обеспечивает скачкообразную решающую функцию, в таких функциях присутствует время фронта и спада [2]. Поэтому затруднительно получить

идеальные параметры порогового устройства и добиться изменения его состояния скачком.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод о целесообразности разработки математической модели приемника радиосигналов с учетом инерционности элементной базы, связанных с нелинейностями при переходе сигнала из устойчивых состояний, влияющих на вид решающей функции порогового устройства, с целью оценки возможного повышения эффективности работы обнаружителей.

Постановка задачи

При разработке математической модели будем рассматривать радиосигнал со случайными параметрами. В реальных условиях работы приемника часто встречается радиосигнал со случайной начальной фазой.

На практике по ряду причин при приеме сигналов время прихода сигнала на устройство обнаружения зачастую неизвестно. Так, при обнаружении движущейся цели фаза сигнала является случайной величиной. Отсутствие априорных данных о начальной фазе принимаемого сигнала обуславливает наличие в структурной схеме обнаружителя двух каналов. В случае, когда полезный сигнал оказывается

© Волобуев М.Ф., Костенников В.С., Шмойлов А.О., 2021

сдвинутым относительно опорного напряжения в первом канале на 90°, то приращение напряжения в этом канале на входе интегратора не будет. Но во втором канале приемника данное приращение окажется максимальным. Также, как следует из [3], при использовании двух корреляционных каналов приёмника результат вычисления огибающей сигнала не зависит от истинного значения начальной фазы принимаемого сигнала, что делает схему двухканального корреляционного приемника сигналов наиболее подходящей к обнаружению выбранного вида сигнала.

Как уже было сказано, устойчивое состояние порогового устройства мгновенно измениться не может ввиду инерционности свойств компонентов, входящих в его состав. Известно [4], что такое поведение устройств удобно описывать различными видами функций принадлежности. Наиболее распространенными и подходящими под переходной процесс в рассматриваемом случае являются функции Sобразного типа. Но ввиду сложности математического описания таких функций и достаточности подтверждения адекватности разрабатываемой математической модели воспользуемся вырожденным случаем S-образной решающей функции - ее кусочно-линейной аппроксимацией [5, 8].

В связи с этим в статье разрабатывается математическая модель приема радиосигнала со случайной начальной фазой, принимаемого в условиях шума корреляционным приемником, в котором решающая функция порогового устройства будет описана кусочно-линейной аппроксимацией [9].

Схема корреляционного приемника

Воспользуемся известной схемой корреляционного приемника [6], которая представлена на рис. 1.

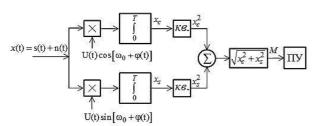


Рис. 1. Схема корреляционного приемника

Аддитивная смесь сигнала и шума поступает на вход двухканального корреляционного устройства обнаружения сигналов

$$x(t) = s(t) + n(t), \qquad (1)$$

где $s(t) = U(t)\cos(\omega_0 t + \phi(t))$, U(t) — амплитуда сигнала, ω_0 — частота сигнала, $\phi(t)$ — начальная фаза сигнала, которая в рассматриваемом примере носит случайный характер, n(t) — помехи.

Рассматриваемый приемник состоит из двух параллельно включенных корреляторов, выполняющих операции умножения принимаемой аддитивной смеси сигнала $\mathbf{x}(t)$ на опорные сигналы и дальнейшего вычисления корреляционных интегралов полученных произведений. Выходные сигналы параллельных корреляторов \mathbf{x}_s и \mathbf{x}_c после объединения в квадратуре дают огибающую M, также называемую выходным эффектом приемника, который подается на пороговое устройство (ПУ) и равен

$$M = \left[\int_{0}^{T} x(t)U(t)\cos[\omega_{0}t + \varphi(t)]dt \right]^{2} + \left[\int_{0}^{T} x(t)U(t)\sin[\omega_{0}t + \varphi(t)]dt \right]^{2} =$$

$$= \left[\frac{a}{2} \int_{0}^{T} U^{2}(t)dt\cos\varphi_{0} + N_{c} \right]^{2} + \left[\frac{a}{2} \int_{0}^{T} U^{2}(t)dt\sin\varphi_{0} + N_{s} \right]^{2} =$$

$$= \left[aE_{1}\cos\varphi_{0} + N_{c} \right]^{2} + \left[-aE_{1}\sin\varphi_{0} + N_{s} \right]^{2}, \quad (2)$$

в котором шумовые составляющие квадратурных сигналов представлены в виде нормальных случайных процессов:

$$\frac{N_c}{N_s} = \int_0^T \mathbf{n}(t)U(t) \frac{\cos}{\sin} \left[\omega_0 t + \varphi(t) \right] dt$$

Выполнив нормировку выходного эффекта приемника на $\sigma_n^2 = \frac{N_0 E_1}{2}$, получим выражение, определяющее алгоритм работы корреляционного обнаружителя:

$$\left[\frac{aE_1}{\sigma_n}\cos\varphi_0 + \hat{N}_c\right]^2 + \left[-\frac{aE_1}{\sigma_n}\sin\varphi_0 + \hat{N}_s\right]^2 \ge \frac{M_{nop}}{\sigma_n^2}, \quad (3)$$

где

$$\hat{N}_c = \frac{N_c}{\sigma_n}, \quad \hat{N}_s = \frac{N_s}{\sigma_n}, \quad \frac{M_{nop}}{\sigma_n^2} = \hat{M}_{nop},$$
$$\sigma_n^2 = \frac{N_0 E_1}{2}.$$

В задачах радиолокации, когда априорное распределение вероятности присутствия сигнала неизвестно, используют оптимальное правило Неймана-Пирсона [7].

Согласно оптимальному критерию Неймана-Пирсона осуществляется разделение области всех возможных реализаций на две отдельные подобласти, определяющие принятие решения о наличии полезного сигнала в принятой реализации или его отсутствие. Следует отметить, что выбор из двух областей сопровождается наличием ошибок первого и второго рода, соответственно, ложная тревога — когда принимается гипотеза о наличии сигнала, в то время, когда его нет, и пропуск сигнала — когда принимается гипотеза об отсутствии сигнала, в то время, когда он есть. Критерий Неймана-Пирсона обеспечивает максимальную вероятность правильного обнаружения при требуемой, в зависимости от системы применения, вероятности ложной тревоги.

Для определения величины порога воспользуемся критерием Неймана-Пирсона. Необходимо задать вероятность ложной тревоги

$$F = \int_{\hat{M}_{nop}}^{\infty} M \cdot e^{\left(-\frac{\hat{M}}{2}\right)^2} dM = e^{\left(-\frac{\hat{M}_{nop.}}{2}\right)^2}.$$

Далее вычислим нормированное пороговое значение

$$\hat{M}_{nop} = -\ln F \,. \tag{4}$$

Запишем выражение (3), учитывая (4)

$$\left[\sqrt{Q}\cos\varphi_0 + \hat{N}_c\right]^2 + \left[-\sqrt{Q}\sin\varphi_0 + \hat{N}_s\right]^2 \ge -\ln F, \quad (5)$$
 the

$$\sqrt{Q} = \frac{aE_1}{\sqrt{\frac{N_0 E_1}{2}}} = \sqrt{\frac{2a^2 E_1}{N_0}}$$
 — отношение

сигнал/шум.

Таким образом, зная все вычисления работы схемы корреляционного приемника, можем приступить к реализации его математической модели.

Решающие функции порогового устройства корреляционного приемника

Согласно существующей классической теории обнаружения радиосигналов в пороговом устройстве, выносится решение о присутствии сигнала при превышении выходным эффектом приемника установленного порогового значения. Исходя из этого решающее правило, заложенное в пороговое устройство в классическом представлении, имеет вид

$$\delta(M) = \begin{cases} 1, & M \ge M_{nop.}; \\ 0, & M < M_{nop.}, \end{cases}$$

что соответствует идеализированной решаю-

щей функции порогового устройства (рис. 2, функция 1), которую синтезировать на существующей элементной базе затруднительно ввиду наличия инерциальных свойств и наличия задержки.

При таком подходе решения задачи обнаружения сигналов принимается достаточное количество допущений с целью упрощения получения аналитических выражений, в том числе и упускается существующая нелинейность решающих функций пороговых устройств [8].

В работах [9], [10] получены аналитические выражения приема сигналов в условиях шума с применением в качестве решающих функций пороговых устройств нелинейных функций двух видов. Для упрощения построения математической модели воспользуемся одной из них - кусочно-линейной аппроксимацией решающей функции, используемой в [9], отличной от (5) наличием наклона и состояний, принимающих любое значение от 0 до 1 на интервале выходного эффекта приемника под проекцией функции (рис. 2, функции 2 и 3) [11]. Так как кусочно-линейная аппроксимация упрощает многие вычисления, она не лишает возможности оценить адекватность разрабатываемой имитационной модели с применением предполагаемого подхода к описанию решающих функции пороговых устройств, отличных от оптимальных [8].

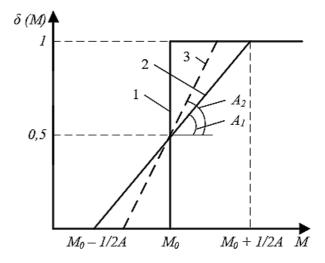


Рис. 2. Решающие функции пороговых устройств

Решающие функции 2 и 3, показанные на рис. 2, можно представить в виде решающих правил как

$$\delta(M) = \begin{cases} 1, & M > M_0 + \frac{1}{2A}; \\ A(M - M_0) + \frac{1}{2}, M_0 - \frac{1}{2A} < M < M_0 + \frac{1}{2A}; \\ 0, & M < M_0 - \frac{1}{2A}, \end{cases}$$
 (6)

где A — тангенс угла наклона функции на интервале $M_0 - \frac{1}{2A} < M < M_0 + \frac{1}{2A}$, где решающая функция линейно зависит от M, M_0 — значение выходного эффекта приемника, в котором $\delta(M) = 0,5$.

В работе [9] эффективность устройств обнаружения сигналов при вынесении решения о наличии или отсутствии сигнала со случайной начальной фазой на фоне шума оценивается усредненным решением вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги. При наличии сигнала на входе приемника выражение для вероятности правильного обнаружения, учитывающее решающее правило пороговых устройств [9, 12], записывается как

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(M) W_1(M) dM, \qquad (7)$$

где $\delta(M)$ — решающая функция [12], $W_1(M)$ — плотность распределения вероятностей огибающих сигнала с шумом при приеме сигнала со случайной начальной фазой [9], которая определяется формулой

$$W_1(M) = \frac{M}{\sigma_{uu}^2} \cdot \exp\left(-\frac{M^2 + a^2 E_1^2}{2\sigma_{uu}^2}\right) I_0\left(\frac{MaE_1}{\sigma_{uu}^2}\right), (8)$$

где $\sigma_{w}^{\ \ 2}=N_{0}E_{1}\,/\,2$ — мощность шума на выходе приемника, $E_{1}=\frac{1}{2}\int\limits_{T}\left(U(t)\right)^{2}dt$ — энергия

сигнала с единичной амплитудой,

$$I_0 \left(\frac{MaE_1}{\sigma_w^2} \right) -$$
 функции Бесселя нулевого порядка [9].

Формула для вычисления вероятности ложной тревоги, учитывающая решающее правило пороговых устройств [9, 12], имеет вид

$$F = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(M) W_0(M) dM, \qquad (9)$$

 $W_0(M)$ — плотность распределения вероятностей огибающих шума, когда рассматриваемый сигнал отсутствует, определяется формулой [8, 9]

$$W_0(M) = \frac{M}{\sigma_w^2} \cdot \exp\left(-\frac{M^2}{2\sigma_w^2}\right). \tag{10}$$

По полученным аналитическим выражениям в ходе решения интегралов (7) и (9) строились вероятности правильного обнаружения сигналов со случайной начальной фазой [8, 9]. Результаты теоретических исследований работы [8] показывают, что характеристики обнаружения радиосигналов при использовании оптимальной и кусочно-линейной решающих функций отличаются. Пороговое устройство с кусочно-линейной аппроксимацией имеет меньшую вероятность правильного обнаружения по сравнению с оптимальным представлением решающей функции в пороговом устройстве. Перейдем к получению результатов моделирования с целью подтверждения теоретических исследований и оценке возможности применения кусочно-линейной решающей функции порогового устройства на имитационной модели функционирования двухканального корреляционного обнаружителя радиосигнала со случайной начальной фазой.

Результаты

Моделирование выполнено в интерактивной среде программирования, используемой для создания моделей и осуществления численных расчетов Matlab версии-r2015b. Вид решающих функций пороговых устройств при проведении имитационного моделирования функционирования корреляционного приемника проиллюстрирован на рис. 3.

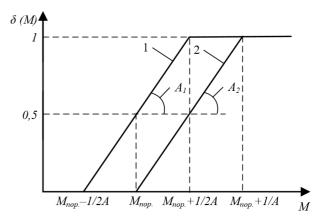


Рис. 3. Решающие функции для моделирования

Здесь представлены решающие функции пороговых устройств 1 и 2, у которых углы наклона равны A_1 = A_2 , задано пороговое значение $M_{\text{пор.}}$, вычисленное по формуле (4), также

заданы интервалы, при которых каждая решающая функция переходит в одно из устойчивых состояний. Запишем решающие правила для пороговых устройств с характеристическими функциями, расположенными как на рис. 3. Для пороговых устройств с функцией 1 — выражение (11)

$$\delta_{l}(M) = \begin{cases} 1, & M > M_{nop.} + \frac{1}{2A}; \\ A(M - M_{nop.}) + \frac{1}{2}, & M_{nop.} - \frac{1}{2A} < M < M_{nop.} + \frac{1}{2A}; \\ 0, & M < M_{nop.} - \frac{1}{2A}. \end{cases}$$
(11)

Для ПУ с функцией 2 – выражение (12)

$$\delta_{2}(M) = \begin{cases} 1, & M > M_{nop.} + \frac{1}{A}; \\ A(M - M_{nop.}), & M_{nop.} < M < M_{nop.} + \frac{1}{A}; \\ 0, & M < M_{nop.}. \end{cases}$$
(12)

Следует отметить, что при попадании значений выходного эффекта в интервалы, лежащие под наклоном решающих функций, для решающей функции (11) — это интервал $\left[M_{nop.} - \frac{1}{2A}; M_{nop.} + \frac{1}{2A} \right], \quad \text{а для (12)} \quad - \\ \left[M_{nop.}; M_{nop.} + \frac{1}{A} \right], \quad \text{приемник осуществляет умножение выходного эффекта на рассчитанные по формулам } A(M-M_{nop.}) + \frac{1}{2} \quad \text{и}$ $A(M-M_{nop.})$ соответствующие коэффициен-

M — M_{nop} .) соответствующие коэффициенты усиления, и уже полученное произведение сравнивает с порогом, после чего для значений выходного эффекта M на выбранных интервалах выносится решение о присутствии сигнала в принимаемой реализации.

Воспользуемся встроенным языком программирования для реализации математических алгоритмов работы корреляционного приемника для выполнения математического моделирования согласно поставленной задаче и получим зависимости вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум при приеме сигнала со случайной начальной фазой (рис. 4).

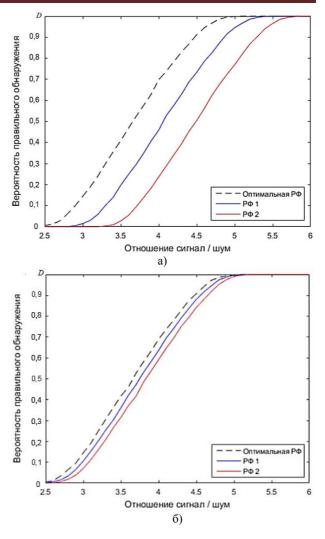


Рис. 4. Вероятности правильного обнаружения с использованием кусочно-линейных решающих функций

Из полученных зависимостей вероятностей правильного обнаружения сигнала корреляционным приемником с кусочно-линейными решающими функциями пороговых устройств (11) и (12), заданной вероятностью ложной тревоги $F = 10^{-4}$, углами наклона решающих функций 6° (рис. 4a) и 35° (рис. 4б) видно, что вероятность правильного обнаружения в обоих случаях стремится к оптимальным параметрам вероятности правильного обнаружения при увеличении А. Также из представленных графиков видно влияние расположения решающих функций относительно порогового значения. В обоих случаях, когда решающая функция берет начало из порогового значения (12) и когда решающая функция равняется 0,5 в точке порога (11), вероятность правильного обнаружения уменьшается при большем отношении сигнал/шум. Причем в случае с функцией (12), расположенной правее (11), вероятность правильного обнаружения ниже. Так, с наклоном

решающих функций в 6° при отношении сигнал/шум, равном 16 дБ, вероятность правильного обнаружения для функции (11) составляет 0,45, а для функции (12) – 0,22, а при бинарной решающей функции при указанном отношении сигнал/шум вероятность составляет 0,72.

Заключение

Разработана математическая модель двухканального корреляционного приемника радиосигналов с кусочно-линейной аппроксимацией решающей функции порогового устройства, который настроен на прием сигнала со случайной начальной фазой в условиях белого гауссовского шума. Выполнено моделирование для приема радиосигналов с предлагаемой решающей функцией и оптимальной, которая используется в известной классической теории обнаружения радиосигналов.

Установлено, что математическая модель корреляционного приемника с пороговым устройством, решающая функция которого описана кусочно-линейной аппроксимацией, увеличивает ошибки первого рода. С увеличением наклона решающей функции вероятность правильного обнаружения стремится к оптимальным характеристикам. Предлагаемый подход применения решающих правил, отличных от оптимальных, позволяет получать оптимальные характеристики обнаружения радиосигналов с учетом нелинейности перехода пороговых устройств в устойчивые состояния.

Литература

1. Тихонов В.И. Статическая радиотехника. М.: Со-

- ветское радио, 1966. 622 с.
- 2. Электронный ресурс: URL: https://www.analog.com/ru/products/analog-functions/comparators.html. Дата обращения 05.03.2021 г.
- 3. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радионавигации: учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1992. 304 с.
- 4. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.П. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.
- 5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
- 6. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2003. 400 с.
- 7. Palacios Játiva P., Román-Cañizares M., Saavedra C., Freire J.J. (2020) Signal Detection Methods in Cognitive Radio Networks: A Performance Comparison. In: Narváez F., Vallejo D., Morillo P., Proaño J. (eds) Smart Technologies, Systems and Applications. SmartTech-IC 2019. Communications in Computer and Information Science, vol 1154. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46785-2 6
- 8. Нахмансон Г.С., Костенников В.С., Шмойлов А.О. Характеристики обнаружения радиосигналов при нелинейной решающей функции порогового устройства // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 10. С. 801–808
- 9. Нахмансон Г.С., Костенников В.С., Шмойлов А.О. Влияние нелинейности решающей функции порогового устройства на характеристики обнаружения радиосигналов // Нелинейный мир. 2019. № 3. С. 36–44.
- 10. Nakhmanson, G.S., Kostennikov, V.S. & Shmoilov, A.O. Characteristics of Radio-Signal Detection for the Nonlinear Decision Function of a Threshold Device. Radiophys Quantum El 62, 713–719 (2020). https://doi.org/10.1007/s11141-020-10017-z
- 11. Рагимов А.Б. Об одном подходе к решению задач оптимального управления на классах кусочнопостоянных, кусочно-линейных и кусочно-заданных функций // Вестник Томского госуниверситета. 2012. № 2 (19). С. 20.
- 12. Бердышев В.П. Радиолокационные системы: учебник. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 400 с.

Поступила 31.03.2021; принята к публикации 20.08.2021

Информация об авторах

Волобуев Михаил Федорович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных систем), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54«А»), e-mail: volmf81@mail.ru, тел. 8-980-347-71-03

Костенников Виталий Сергеевич – младший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54«А»), e-mail: vitaly.kostennickov@yandex.ru, тел. 8-950-772-77-61

Шмойлов Антон Олегович — младший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54«А»), e-mail: aoshmoilov@mail.ru, тел. 8-950-775-92-02

MATHEMATICAL MODEL OF A CORRELATION RECEIVER WITH A PIECEWISE LINEAR APPROXIMATION OF THE DECISION FUNCTION OF THE THRESHOLD DEVICE

M.F. Volobuev, V.S. Kostennikov, A.O. Shmoylov

Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E.Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy", Voronezh, Russia

Abstract: we developed a mathematical model of a two-channel correlation receiver of radio signals with piecewise linear approximation of the decision function of the threshold device. The receiver is designed to receive the most commonly encountered signals in practice with a random initial phase in a white Gaussian noise environment. In the synthesized mathematical model, a piecewise linear approximation of the decision function of the threshold device is used. We carried out a comparative analysis of the characteristics of detecting radio signals with a random initial phase from the signal-to-noise ratio, calculated using the developed mathematical model of a correlation receiver with a piecewise linear decision function of the threshold device and known. The paper presents the dependences of the probability of correct detection on the signal-to-noise ratio obtained as a result of mathematical modeling of the process of functioning of the correlation receiver when detecting signals with a random initial phase under noise conditions. We show that the results of simulation are consistent with theoretical calculations. We found that the representation of the decision functions of threshold devices in the classical theory of signal detection in the form of idealized (optimal) ones, which do not take into account their nonlinearity, lead either to an increase in the probability of a false alarm, or to a decrease in the probability of correct detection, which leads to errors of the first kind

Key words: mathematical model, signal detection, decision function, threshold device, simulation

References

- 1. Tikhonov V.I. "Static radio engineering" ("Staticheskaya radiotekhnika"), Moscow, Sovetskoe radio, 1966, 622 p.
- 2. https://www.analog.com//ru/products/analog-functions/comparators.html. (access date: 03.05.2021)
- 3. Sosulin Yu.G. "Theoretical foundations of radio navigation" ("Teoreticheskie osnovy radionavigatsii"), textbook, Moscow, Radio i Svyaz', 1992, 304 p.
- 4. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. "Fuzzy model decision making: case studies" ("Prinyatie resheniy na osnove nechetkikh modeley: Primery ispol'zovaniya"), Riga, Zinatne, 1990, 184 p.
- 5. Gonorovskiy I.S. "Radio engineering circuits and signals" ("Radiotekhnicheskie tsepi i signaly"), Moscow, Radio i Svyaz', 1986, 512 p.
- 6. Perov A.I. "Statistical theory of radio engineering systems" ("Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem"), textbook, Moscow, Radiotekhnika, 2003, 400 p.
- 7. Palacios Játiva P., Román-Cañizares M., Saavedra C., Freire J.J. "Signal detection methods in cognitive radio networks: a performance comparison", *Smart Technologies, Systems and Applications. SmartTech-IC 2019. Communications in Computer and Information Science*, vol 1154, Springer, Cham, 2020, available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-46785-2 6
- 8. Nakhmanson G.S., Kostennikov V.S., Shmoilov A.O. "Characteristics of the detection of radio signals with a nonlinear decision function of the threshold device", *News of Universities. Radiophysics (Izvestiya vuzov)*, 2019, vol. 62, no. 10, pp. 801–808.
- 9. Nakhmanson G.S., Kostennikov V.S., Shmoylov A.O. "Influence of the nonlinearity of the decision function of the threshold device on the characteristics of the detection of radio signals", *Nonlinear World (Nelineynyy mir)*, 2019, no. 3, pp. 36-44.
- 10. Nakhmanson G.S., Kostennikov V.S., Shmoylov A.O. "Characteristics of radio-signal detection for the nonlinear decision function of a threshold device", *Radiophys Quantum El*, 2020, no. 62, pp. 713-719, available at: https://doi.org/10.1007/s11141-020-10017-z
- 11. Ragimov A.B. "On one approach to solving optimal control problems on the classes of piecewise constant, piecewise linear and piecewise given functions", *Bulletin of Tomsk State University (Vestnik Tomskogo gosuniversiteta)*, 2012, no. 2 (19), pp. 20.
 - 12. Berdyshev V.P. "Radar systems" ("Radiolokatsionnye sistemy"), textbook, Krasnoyarsk, 2011, 400 p.

Submitted 31.03.2021; revised 20.08.2021

Information about the authors

Mikhail F. Volobuev, 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 Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: volmf81@mail.ru, tel. +7-980-347-71-03

Vitaliy S. Kostennikov, research assistant, 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: vitaly.kostennickov@yandex.ru, tel. +7-950-772-77-61

Anton O. Shmoylov, research assistant, 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: aoshmoilov@mail.ru, tel. +7-950-775-92-02

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.013 УДК 621.396

РАЗРАБОТКА МІМО АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ СЕТЕЙ 5G

К.А. Бердников¹, Е.А. Ищенко¹, В.В. Кузнецова¹, С.М. Фёдоров^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия ²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается антенная система для сетей пятого поколения частот 37 ГГц (миллиметровый диапазон радиоволн). Предлагается установка антенны на задней стенке устройства, а излучение радиоволн происходит через стеклянную заднюю панель устройства. Для функционирования в сетях пятого поколения была разработана МІМО антенная решетка, которая состоит из четырех элементов и способна функционировать в «умном» режиме. Благодаря этому возможно формирование луча в антенной системе (beamforming). Для анализа характеристик антенной системы были получены коэффициенты корреляции огибающей, диаграммы направленности, картины электрических полей, получены зависимости эффективной изотропно излучаемой мощности (EIRP), построены графики кумулятивных функций распределения EIRP в линейном и логарифмическом масштабе. Для определения влияния излучения на человека были построены картины удельного коэффициента поглощения (SAR) в соответствии с европейскими нормами на 10 грамм тканей. Все полученные результаты показывают высокую эффективность разработанной конструкции антенной решетки для сетей пятого поколения. Антенные элементы обладают малой взаимной корреляцией, позволяют обеспечить формирование луча, кумулятивные функции распределения показывают высокий уровень покрытия сферы эффективной изотропно излучаемой мощности радиоволнами. Также было показано, что разработанная антенная система обладает малым уровнем удельного коэффициента поглощения, что доказывает безопасность сетей пятого поколения миллиметрового диапазона радиоволн. Развитие современных систем связи позволяет достичь высокой безопасности и эффективности при получении информации

Ключевые слова: сети пятого поколения (5G), МІМО антенная решетка, эффективная изотропно излучаемая мощность (EIRP), кумулятивная функция распределения (CDF), удельный коэффициент поглощения (SAR)

Введение

Разработка антенных систем для сетей пятого поколения является важной и перспективной задачей, так как повсеместное внедрение сетей 5G позволит достичь нового уровня качества получения информации. В работах авторов [1-3] предлагается размещение антенн для сетей 5G миллиметрового диапазона радиоволн (mmWave) по контуру устройства, однако такое размещение имеет ряд недостатков: по контуру мобильных устройств размещаются антенные системы других стандартов связей; перекрытие антенн рукой абонента, что приводит к нарушению связи; так как внешний контур большинства устройств выполнен из металлов установка разделителей антенн, через которые распространяются радиоволны. Одним из перспективных способов размещения антенн является задняя панель устройства, так как в последнее время основным материалом изготовления выступает стекло, которое выступает диэлектриком, а следовательно, является проницаемым для радиоволн. В данной работе рассматривается конструкция МІМО антенной решетки для сетей 5G частотного диапазона 37 ГГц, которая предназначается для установки на задней стенке устройства.

Конструкция антенны

В качестве базового антенного элемента был выбран микрополосковый патч-излучатель [4], базовый эскиз которого приводится на рис.

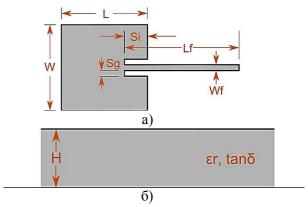


Рис. 1. Исследуемый антенный элемент

Разработанный антенный элемент разрабатывался с учетом того, что закалённое стекло,

99

 $^{\ \, \}mathbb{O}\,$ Бердников К.А., Ищенко Е.А., Кузнецова В.В., Фёдоров С.М., 2021

из которого изготавливаются элементы корпуса мобильных устройств, имеют: $\varepsilon=4.82$, $\delta=0.0054$. На основе антенных элементов, которые приводятся на рис. 1, была сформирована smart-MIMO антенная решетка, которая обладает технологией формирования луча (beamforming). Конструкция антенной решетки приводится на рис. 2.

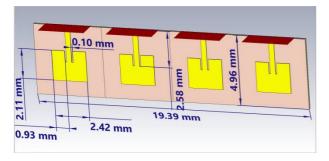


Рис. 2. Полученная МІМО антенная решетка

Как видно, антенные элементы имеют малые размеры, так как разрабатывались для миллиметрового частотного диапазона (37 ГГц). Для планарных антенн очень важными являются параметры толщины медного проводника и диэлектрической подложки. В качестве материала изготовления был выбран фольгированный диэлектрик Rogers RO4730G3, который был специально разработан для изготовления антенн для сетей пятого поколения миллиметрового диапазона радиоволн, так данный материал обладает: $\varepsilon = 2.98, \delta = 0.003$, толщина медного напыления составляет 35 мкм. Характеристики излучателя приведены на рис. 3.

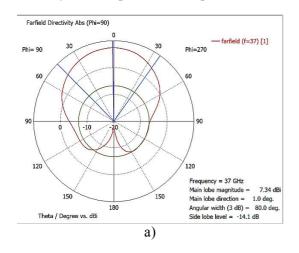
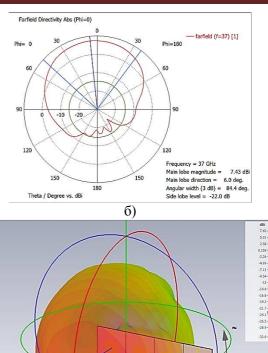


Рис. 3. Диаграммы направленности предлагаемой конструкции: а), б) вертикальные срезы диаграммы направленности; в) трехмерная диаграмма направленности



B)

Рис. 3. Диаграммы направленности предлагаемой конструкции: а), б) вертикальные срезы диаграммы направленности; в) трехмерная диаграмма направленности (продолжение)

Как видно по полученным графикам, диаграмм направленности, наблюдается широкий главный лепесток, что позволяет улучшить качество связи и простоту подключения для абонента. На рис. 4 приводится картина Е-поля на антенной решетке.

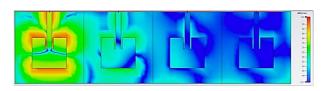


Рис. 4. Картина распространения Е-поля

Для любой MIMO антенной системы важным параметром выступает коэффициент корреляции огибающей [5]:

$$ECC = \frac{|S_{mm}^*S_{nm} + S_{mn}^*S_{nn}|^2}{(1 - |S_{mm}|^2 - |S_{mn}|^2)(1 - |S_{nm}|^2 - |S_{nn}|^2)^*} . \quad (1)$$

Для полученной антенной решетки характеристики корреляции приведены на рис. 5.

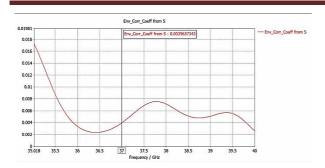


Рис. 5. Коэффициент корреляции для соседних двух элементов

Как видно по полученным результатам, система малокоррелируема, что показывает высокую эффективность МІМО режима. Однако очень важно учитывать, что приведенные результаты могут измениться после установки антенной системы в корпус мобильного устройства, поэтому произведем анализ полной конструкции, установленной в корпус.

Моделирование системы в корпусе устройства

Конструкция устройства приведена на рис. 6. Причем между антенной и задним стеклом имеется воздушная прослойка в 0.93 мм, что вызвано возможностью размещения катушки беспроводной зарядки в корпусе устройства.

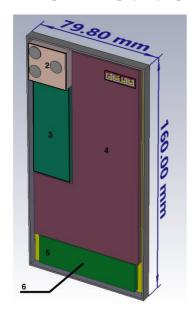


Рис. 6. Мобильное устройство: 1) антенный модуль сетей 5G 37 ГГц; 2) модуль камер; 3) печатная плата; 4) аккумуляторная батарея; 5) нижний шлейф устройства; 6) стеклянная крышка

Как видно из рисунка, выбранное месторасположение антенной системы позволяет максимально снизить влияние окружающих компонентов на распространение радиоволн. Произведем анализ характеристик антенной системы после установки в корпус, на рис. 7 приводятся S_{mm} параметры антенных элементов (главная диагональ — возвратные потери).

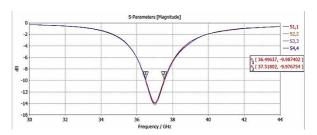


Рис. 7. Возвратные потери антенных элементов

Как видно по полученным результатам, антенные элементы обладают диапазоном рабочих частот от 36.5 до 37.5 ГГц. Для более подробного анализа результатов установки антенной системы рассмотрим картины полей и диаграмму направленности антенного элемента, установленного в корпусе устройства — рис. 8

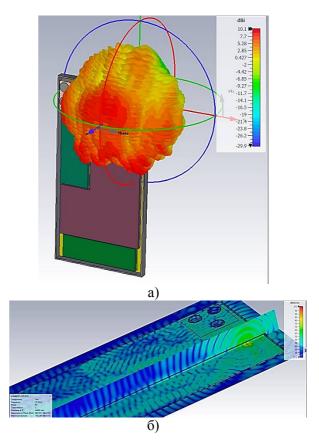


Рис. 8. Результаты моделирования антенной системы: а) диаграмма направленности в корпусе устройства на частоте 37 $\Gamma\Gamma$ ц;

б) картина распространения Е-поля в устройстве

Как уже было сказано, ранее разрабатываемая антенная решетка обладает технологией beamforming, а также способна работать в MU-MIMO режимах, поэтому произведем анализ характеристик антенной системы после установки в корпусе устройства.

Характеристики антенной решетки миллиметрового диапазона с технологией формирования луча в корпусе устройства

Анализ МІМО антенной системы начнем с коэффициента корреляции огибающей, так как он мог измениться ввиду помех, которые вносит корпус мобильного устройства — рис. 9.

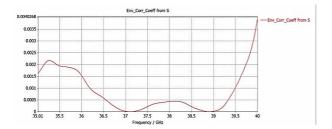


Рис. 9. Коэффициент корреляции огибающей

Как видно по полученным результатам, произошло снижение между антенными элементами в антенной решетке, что приводит к улучшению характеристик антенной системы. Теперь рассмотрим наличие возможности управления лучом антенной системы. В процессе использования технологии beamforming происходит синхронное запитывание антенной системы с разным фазовым распределением. Базовыми точками отсчета являются: нулевые сдвиги фаз, фазы 0, 45, 90, 135 и 0, -45, -90, -135. Далее на основе полученных картин диаграмм направленности строятся трехмерные картины эффективной изотропно излучаемой мощности или EIRP.

EIRP определяется как усиление антенны, умноженное на мощность, которая передается на антенну от передатчика. EIRP эквивалентен мощности, которую должен излучить изотропный излучатель для достижения того же уровня сигнала в исследуемом направлении. Таким образом, EIRP, как и КНД, является функцией направления, то есть зависит от рассматриваемого угла в пространстве; величина EIRP лежит в пределах от 0 до бесконечности и имеет выраженный максимум и минимум, для идеального изотропного излучателя максимальное значение равно минимальному.

Для анализа значений EIRP, которые излучает антенный элемент, применяют кумулятивную функцию распределения вероятностей (CDF). Так, базовая функция плотности вероятности EIRP определяется как:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(E)dE = \int_{E_{min}}^{E_{max}} f(E) dE = 1.$$
 (2)

Таким образом, вероятность нахождения значений EIRP в диапазоне определяется как:

$$P = \int_{E_1}^{E_2} f(E) dE.$$
 (3)

Учитывая, что в трехмерных координатах пространство представляется в виде сферы, которая с расширением увеличивается, а следовательно, и увеличивается величина значений EIRP, тогда становится возможным построение CDF, которая покажет вероятность наблюдения значений менее заданного порога:

$$F(EIRP) = \int_{-\infty}^{EIRP_1} f(E)dE. \tag{4}$$

Таким образом, данный график покажет, какая доля покрытой сферы находится за пределами сферы радиуса EIRP. Можно сделать вывод, что чем большее значение имеет EIRP на данном уровне CDF [6, 7], тем большую мощность обеспечивает диаграмма направленности.

Для полученной антенной системы применение фазового распределения и полученных значений EIRP приводится на рис. 10.

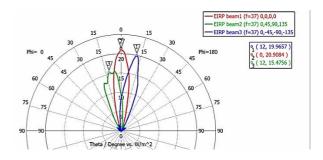


Рис. 10. Графики EIRP при применении различных фазовых сдвигов

Как видно по полученным графикам, удается достичь управления направлением излучения, что и является основной задачей формирования луча, однако, как видно при применении фазового распределения в 0, 45, 90, 135, заметны искажения в характеристиках EIRP, которые возникают вследствие модуля камер, который выступает из корпуса и мешает распростране-

нию радиоволн. Суммарная огибающая полученных характеристик приводится на рис. 11.

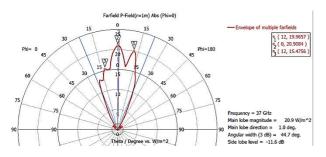


Рис. 11. Огибающая зависимостей EIRP

Как видно по графику, все пиковые значения лежат в диапазоне уровня половины мощности от максимума, то есть возможно обеспечение плавного изменения положения главного лепестка. Постоем графики кумулятивной функции распределения EIRP – рис. 12.

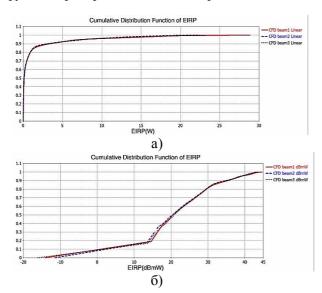


Рис. 12. Кумулятивные функции распределения EIRP: а) линейный масштаб; б) логарифмический (шкала EIRP в дБмВт). Веат 1 – нулевое фазовое распределение; Beam2 – 0, 45, 90, 136; Beam3 – 0, -45, -90, -135

Так на графике функции распределения определяется уровень 0.5, который соответствует половине покрытия сферы для 50% точек приема устройств. Для полученных зависимостей это значение составило 0,11 Вт или 20,5 дБмВт.

Как видно из полученных результатов, антенна для сетей 5G миллиметрового диапазона обеспечивает высокие характеристики МІМО антенной решетки, а также позволяет обеспечить режим формирования луча (beamforming), также полученные графики функций распределения EIRP показывают высокую эффективность работы системы.

Моделирование удельного коэффициента поглошения

Удельный коэффициент поглощения или SAR [8, 9] является важной составляющей при разработке электроники, так как показывает, какое количество электромагнитной энергии поглотят ткани человека. В процессе моделирования рис. 13 исследование производилось по алгоритму для Европейского Союза, где измерение производится в соответствии с учетом на 10 гр. тканей, при этом максимально допустимое значение составляет 2 Вт/кг на 10 гр. тканей.

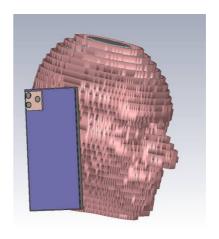


Рис. 13. Модель для исследования SAR

Суммарный уровень SAR определяется в соответствии с:

$$SAR = \frac{\sigma \vec{E}^2}{a} \tag{5}$$

$$SAR = \frac{\sigma \vec{E}^2}{\rho}$$
 (5)

$$SAR = \frac{J^2}{\rho \sigma}$$
 (6)

$$SAR = c_i \frac{dT}{dt},$$
 (7)

$$SAR = c_i \frac{dT}{dt}, \qquad (7)$$

где Е – напряженность электрического поля

J – плотность токов (A/M^2);

 ρ – плотность тканей человека (кг/м³);

 σ – электрическая проводимость (См/м);

 c_{i} — теплоемкость человеческих тканей (Дж/(кг·K));

 $\frac{dT}{dt}$ — производная температуры тканей по времени (К/с).

Так как тело человека является диэлектриком, то алгоритм расчета основан на записи потерь энергии в диэлектрических материалах - рис. 14.

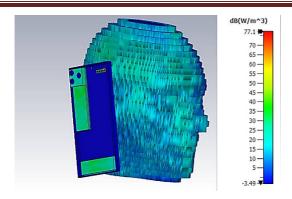


Рис. 14. Потери в диэлектрических материалах

Как видно по полученным результатам, часть энергии поглощают диэлектрические материалы внутри устройства, а это, в свою очередь, понижает уровень SAR – рис. 15.

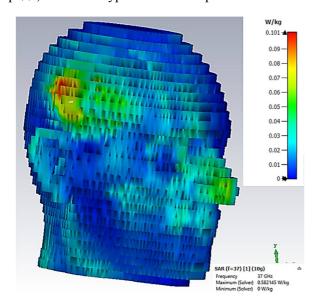


Рис. 15. SAR для разработанной антенной системы

Как видно по полученным результатам, максимальный уровень SAR составил 0.58 Вт/кг на 10 гр. тканей, что намного ниже максимально допустимого уровня.

Заключение

В процессе исследования была разработана умная МІМО антенная решетка для сетей 5G миллиметрового диапазона 37 $\Gamma\Gamma$ ц. Получен-

ные результаты показали высокую эффективность предложенной конструкции, возможность использования технологии beamforming, а также доказана высокая безопасность разработанной конструкции (малый уровень SAR). Был произведен полный анализ характеристик излучения и работы антенной системы с использованием эффективной изотропно излучаемой мощности и кумулятивных функций распределения.

Литература

- 1. Ojaroudiparchin N., Shen M., Pedersen G.F. Multi-layer 5G mobile phone antenna for multi-user MIMO communications // 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR). 2015. Pp. 559-562.
- 2. Phased Array Antenna with Whole-Metal-Cover for MM-Wave 5G Mobile Phone Applications/ H. Lee, J. Bang, S. Lee, J. Choi // 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM). 2018. 1 p.
- 3. mmWave 5G NR Cellular Handset Prototype Featuring Optically Invisible Beamforming Antenna-on-Display/ W. Hong et al. // IEEE Communications Magazine. 2020. Vol. 58, No. 8, Pp. 54-60.
- 4. Stutzman W.L., Thiele G.A. Antenna Theory and Design. Third Edition // Wiley. 2013. 820 p.
- 5. Blanch S., Romeu J., Corbella I. Exact presentation of antenna system diversity performance from input parameter description // Electronics Letters. 2003. Vol. 39. pp. 705-707.
- 6. Hazmi A., Tian R. Throughput and Spherical Coverage Performance of mmWave Dual Polarized Antenna Arrays // 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2020. Pp. 1-4.
- 7. Khripkov A., Ilvonen J., Milosavljevic Z. 5G Millimeter Wave Broadside-Endfire Antenna Array // 2020 International Workshop on Antenna Technology (iWAT). 2020. Pp. 1-4.
- 8. Bang J., Choi J. A SAR Reduced mm-Wave Beam-Steerable Array Antenna With Dual-Mode Operation for Fully Metal-Covered 5G Cellular Handsets // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018. Vol. 17. No. 6. Pp. 1118-1122.
- 9. Thomas T., Charishma G., Veeraswamy K. MIMO antenna system with high gain and low SAR at for UE of 5G operating MM wave: Design. 2015 10th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS). 2015. Pp. 1-5.

Поступила 27.04.2021; принята к публикации 20.08.2021

Информация об авторах

Бердников Кирилл Алексеевич — студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru **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

Кузнецова Валерия Васильевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: lera.kuznetsova.20@bk.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); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9027-6163

DESIGNING A MIMO ANTENNA ARRAY FOR 5G NETWORKS

K.A. Berdnikov¹, E.A. Ishchenko¹, V.V. Kuznetsova¹, S.M. Fyedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia ²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses an antenna system for networks of the fifth generation of 37 GHz frequencies (millimeter-wave radio waves). We propose to install the antenna on the rear wall of the device, radio waves are emitted through the glass rear panel of the device. For functioning in networks of the fifth generation, a MIMO antenna array was developed, which consists of four elements and is capable of functioning in a "smart" mode. This makes it possible to form a beam in the antenna system (beamforming). To analyze the characteristics of the antenna system, we obtained the correlation coefficients of the envelope, directional patterns, patterns of electric fields, the dependences of the effective isotropically radiated power (EIRP), and we plotted the graphs of the cumulative distribution functions of EIRP on a linear and logarithmic scale. To determine the effect of radiation on a person, we built pictures of the specific absorption rate (SAR) in accordance with European standards for 10 grams of tissue. All the results obtained show the high efficiency of the developed design of the antenna array for fifth generation networks. Antenna elements have low cross-correlation, allow for beam formation, cumulative distribution functions show a high level of coverage of the sphere of effective isotropically radiated power by radio waves. We also show that the developed antenna system has a low level of specific absorption coefficient, which proves the safety of fifth-generation networks of millimeter-wave radio waves. The development of modern communication systems makes it possible to achieve high security and efficiency in obtaining information

Key words: fifth generation (5G) networks, MIMO antenna array, effective isotropic radiated power (EIRP), cumulative distribution function (CDF), specific absorption rate (SAR)

References

- 1. Ojaroudiparchin N., Shen M., Pedersen G.F. "Multi-layer 5G mobile phone antenna for multi-user MIMO communications", 2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR), 2015, pp. 559-562.
- 2. Lee H., Bang J., Lee S., Choi J. "Phased array antenna with whole-metal-cover for mm-wave 5G mobile phone applications", 2018 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), 2018, 1 p.
- 3. Hong W. et al. "MM-wave 5G NR cellular handset prototype featuring optically invisible beamforming antenna-on-display", *IEEE Communications Magazine*, 2020, vol. 58, no. 8, pp. 54-60
 - 4. Stutzman W.L., Thiele G.A. "Antenna theory and design. Third edition", Wiley 2013, 820 p.
- 5. Blanch S., Romeu J., Corbella I. "Exact presentation of antenna system diversity performance from input parameter description", *Electronics Letters*, 2003, vol. 39, pp. 705-707.
- 6. Hazmi A., Tian R. "Throughput and spherical coverage performance of mm-wave dual polarized antenna arrays", 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020, pp. 1-4.
- 7. Khripkov A., Ilvonen J., Milosavljevic Z. "5G millimeter wave broadside-endfire antenna array", 2020 International Workshop on Antenna Technology (iWAT), 2020, pp. 1-4.
- 8. Bang J., Choi J. "A SAR reduced mm-wave beam-steerable array antenna with dual-mode operation for fully metal-covered 5G cellular handsets", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, vol. 17, no. 6, pp. 1118-1122.
- 9. Thomas T., Charishma G., Veeraswamy K. "MIMO antenna system with high gain and low SAR at for UE of 5G operating MM wave: Design", 2015 10th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS), 2015, pp. 1-5.

Submitted 27.04.2021; revised 20.08.2021

Information about the authors

Kirill A. Berdnikov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: kir ber@mail.ru

Evgeniy A. Ishchenko, 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

Valeriya V. Kuznetsova, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: lera.kuznetsova.20@bk.ru

Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9027-6163

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.014 УДК 621.396. 621

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАНАЛА СВЯЗИ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИИ

О.Н. Чирков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются методы оценки канала связи с пространственной модуляцией. Данный вид модуляции представляет собой методику однопотоковой передачи данных с несколькими входами и несколькими выходами (МІМО), при которой одновременно активируется только одна передающая антенна. Пространственная модуляция позволяет добиться полного исключения межканальных помех, а также демонстрирует большую экономию энергии в радиочастотной цепи. Однако, в отличие от многопоточных систем МІМО, оценка канала для пространственной модуляции становится проблемой, поскольку канал МІМО не может быть оценен на одном этапе передачи по единственному потоку. На основании этого факта была предложена новая схема оценки канала, которая использует корреляцию каналов и совместно оценивает каналы для разных передающих антенн. Предложенный метод обеспечивает тот же период оценки, что и многопоточные схемы МІМО. Исследовано изменение количества передаваемых пилот-сигналов при пространственной модуляции как для традиционных, так и для новых методов оценки канала связи. Уравновешивая точность и объем данных, можно достичь оптимального отношения пилот-сигналов для максимальной пропускной способности канала. Результаты моделирования показывают, что новый подход оценки превосходит традиционный метод с гораздо более низким оптимальным коэффициентом количества пилотов

Ключевые слова: оценка канала, пилот-сигнал, пространственная модуляция, корреляция, система МІМО

Введение

В течение последнего десятилетия методы множественного входа и множественного выхода (МІМО) активно изучаются для использования как в космической связи, так и для увеличения пропускной способности канала.

Системы МІМО можно разделить на многопоточные и однопоточные.

Двумя типичными многопотоковыми схемами МІМО являются вертикальное многоуровневое пространственно-временное кодирование Bell Labs (V-BLAST) [1] и пространственно-временное блочное кодирование (STBC) [2], в которых разные потоки данных передаются через несколько антенн одновременно. Если рассматривать расположение антенн как точки пространственного созвездия, то пространственная модуляция (ПМ) представляет собой новую однопотоковую систему МІМО [3]. В отличие от многопоточных схем, ПМ активирует одну антенну в любой момент времени и, таким образом, полностью избегает межканальных помех. Кроме того, пространственная модуляция демонстрирует значительную экономию в мощности, поскольку для такого вида передачи данных требуется только одна радиочастотная цепь, независимо от количества используемых антенн.

В обеих схемах для декодирования в приемнике требуется информация о состоянии канала. В результате оценка канала имеет важное значение, но ею часто пренебрегают. Хотя использование единой РЧ-цепи дает ПМ вышеупомянутые преимущества, при оценке канала возникают проблемы. В отличие от многопоточных схем МІМО, пространственная модуляция требует больше времени для передачи пилот-сигналов. В [4] предлагается схема оценки канала с использованием метода наименьших квадратов (LS). Другой метод оценки, основанный на совместной оценке канала с обнаружением данных, представлен в [5]. Однако в обоих методах каналы для разных передающих антенн оцениваются индивидуально. Учитывая соотношение между пилотными и общими символами, то есть отношение пилот-сигнал, период оценки канала связи пропорционален количеству передающих антенн. Другими словами, пропускная способность при пространственной модуляции поддерживает определенный период оценки. Существуют подходы оценки канала для однопоточного МІМО в [6].

Отношения пилот-сигнал важны для оценки канала в двух аспектах. С одной стороны, большее отношение пилот-сигнал может повысить точность оценки и, таким образом, уменьшить потребность в повторных передачах. С другой стороны, скорость передачи данных снижается, поскольку для отправки пилотных

© Чирков О.Н., 2021

сигналов требуется больше времени. Выбирая компромисс между этими двумя факторами, можно определить соответствующее пилотное отношение для достижения максимальной пропускной способности.

Модель системы МІМО

В статье рассматривается система МІМО с пространственной модуляцией $Nt \times Nr$, где Ntпредставляет количество передающих и Nr приемных антенн соответственно. В процедуре кодирования ПМ поток битов делится на блоки длиной fs бит на символ. Затем каждый блок разделяется на две части, соответствующие диаграмме пространственного созвездия и диаграмме сигнального созвездия. Первая часть битов $log_2(Nt)$ активирует одну передающую антенну антенной решетки. Будем использовать t для обозначения активной в данный момент антенны. Вторая часть оставшихся битов используется для выбора символа из определенной совокупности сигналов, такой как квадратурная амплитудная модуляция (QAM) или фазовая манипуляция (PSK).

Затем выбранный символ отправляется через антенну t.

Передаваемый сигнал может быть представлен вектором $x = [x_1, ..., x_t, ..., x_{Nt}]^T$, где t- й элемент - выбранный символ, а остальные - равны нулю. Обозначая усиление канала между і-й передающей антенной и ј-й приемной антенной как $h_{j,i}$, канал Н системы МІМО записывается как:

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N_t} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_T,1} & h_{N_T,2} & \cdots & h_{N_T,N_t} \end{bmatrix}.$$
(1)

Полученный сигнал также является вектором, который можно выразить как:

$$y = Hx + w , (2)$$

где $w = [w_1, ..., w_j, ..., w_{Nr}]^T$ - вектор шума, каждый элемент которого представляет шум на входе каждой приемной антенны. На всех приемных антеннах шум статистически независим. Отношение сигнал/шум (SNR) определяется как Em/No, где Em средняя энергия на передачу символа. Обнаружение совместного максимального правдоподобия (ML) [8] используется для декодирования переданного символа с использованием оцененной информации о канале.

Для моделирования МІМО воспользуемся моделью пространственного канала, соответствующей 3GPP TR 25.996 [7]. Чтобы обеспе-

чить разумное разделение между передающими антеннами, моделирование реализовано в нисходящей линии связи. В модели поддерживаются три сценария: городской макро, городской микро и пригородный макро.

Методы оценки канала связи с пространственной модуляцией

Обычная оценка канала для ПМ оценивает каналы различных передающих антенн индивидуально. Соответствующая структура пилотсигнала проиллюстрирована на рис. 1 вместе со сравнением с многопотоковым МІМО.

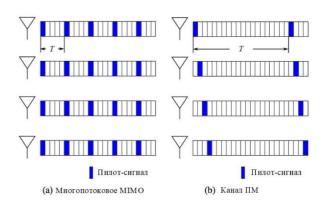


Рис. 1. Порядок построения пилотов

Временной интервал между двумя последовательными выборками оценки канала для одной и той же передающей антенны определяется периодом оценки. Для каждого периода оценки передающие антенны активируются одна за другой для передачи пилот-сигналов. Можно заметить, что для достижения того же отношения пилот-сигналов ПМ на основе обычной оценки канала требуется гораздо более длительный период оценки, чем для многопотоковой схемы МІМО. Коэффициент пилотсигнала обозначим f, а период оценки определяется как:

$$T_0 = \frac{N_t T_s}{f} \,, \tag{3}$$

где *Ts* период символа.

В каждом временном интервале оценки канала для оценки информации о канале активированной в данный момент антенны применяется конкретная оценка: метод наименьших квадратов (LS) или минимальная среднеквадратичная ошибка (MMSE) [9].

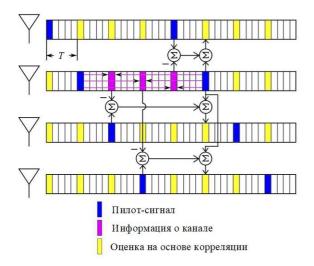


Рис. 2. Оценка канала на основе корреляции

Введем новый метод оценки, исследующий корреляцию (пересечение) каналов при передаче. Рис. 2 демонстрирует концепцию этого подхода, который совместно оценивает каналы для разных передающих антенн. В отличие от обычной оценки, пилотные сигналы, назначенные разным антеннам, равномерно распределены по оси времени.

Предложенный алгоритм

Весь алгоритм независимо реализован на каждой приемной антенне. Будем использовать обозначение hi для каналов от i-й передающей антенны до приемника. В любом слоте сигнала алгоритм выполняется в четыре этапа:

- 1. Оценка канала на основе пилот-сигнала: на первом этапе активируется t-я антенна для передачи пилот-сигнала. Расчетная информация о канале для текущей активной антенны обозначается как $\hat{h}_t(n)$, где n индекс слотов пилот-сигнала.
- 2. Коррекция информации о канале: для каждой передающей антенны пилот-сигнал передается один раз для каждых Nt слотов пилотсигнала. В других временных интервалах Nt-1 t-1 антенна неактивна и соответствующие оценки получаются на основе корреляции, описанной на этапе 1 На данном этапе 1 интерполяции нижних частот на основе текущей оценки 1 1 предыдущих оценок 1 1 предыдущих оценок 1 1 предыдущих оценок 1 1 после интерполяции оследовательности. После интерполяции скорректированная информация о канале 1 передающей

антенны запишется как $\hat{h}_t(n-n')$, $n'=1, 2, ..., N_t-1$.

Для і-й передающей антенны последняя пилотная оценка канала произошла за $n'_{i,t}$ временных интервалов, прежде чем:

первалов, прежде чем.
$$n'_{i,t} = \begin{cases} t - i & \text{if } i < t \\ t - i + N_t & \text{if } i > t \end{cases} \tag{4}$$

3. Оценка канала на основе корреляции: свободные антенны оцениваются на основе текущих оценок t-й антенны и соответствующей разности каналов, полученных на предыдущем этапе.

Обозначим полученную таким образом информацию о канале как $\hat{h}_i(n)$, которая вычисляется по формуле:

$$\hat{h}_i(n) = \hat{h}_t(n) + \Delta K_{i,t}(n - n'_{i,t}), i \neq t \quad (5)$$

 $\hat{h}_i(n)$ и $\hat{h}_t(n)$ содержат оценки канала для всех передающих антенн, которые используются для декодирования при последующей передаче данных.

4. Обновление индекса антенны: последний шаг - установить следующую активную антенну, которая является приращением на единицу к индексу антенны:

$$t = \begin{cases} t+1 & if \ t < N_t \\ 1 & if \ t = N_t \end{cases} . \tag{6}$$

Результаты моделирования

В реальной беспроводной высокоскоростной системе передачи данные передаются пакетами [10]. В приемнике неправильно декодированные пакеты требуют повторной передачи. Эффективная скорость передачи данных, то есть пропускная способность, используется для сравнения производительности оценки канала для различных соотношений пилот-сигналов.

Эффективная скорость передачи данных: прямое исправление ошибок (FEC) обычно применяется для исправления ошибок на физическом уровне. В статье рассматриваются два режима: с FEC и без него. Общая скорость необработанных данных, включая пилоты, определяется как:

$$R = \frac{f_s}{T_s} \,. \tag{7}$$

Обозначим скорость повторной передачи как e, пропускная способность рассчитывается по формуле:

$$D = R(1 - f)(1 - e)f_c , (8)$$

где f_c представляет собой скорость кодирования. В случае, если прямое исправление ошибок не используется, $f_c = 1$.

Предлагаемая методика оценки канала

требует меньшего количества пилотных передач, что влияет на потребление энергии.

Проанализируем прирост энергоэффективности с точки зрения количества эффективных данных на единицу энергии:

$$f_E = \frac{T \times T_S}{E_m} \ . \tag{9}$$

Рассмотрим производительность пространственной модуляции с учетом расчетной информации о канале в рамках реалистичной модели 3GPP TR 25.996. Количество символов необработанных данных на пилот-сигнал обозначается как N_d , то есть $N_d \times f = 1$.

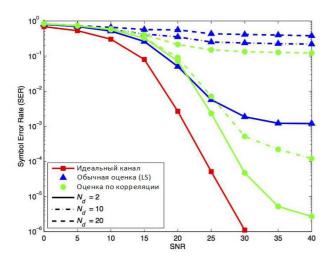


Рис. 3. Характеристики SER для ПМ с Nt=8 и BPSK по SNR на скорости 10~m/c

Количество символов необработанных данных на пилот-сигнал изменяем от 2 до 20, что соответствует пилотному отношению от 50% до 5%. Предложенный метод оценки на основе корреляции канала сравнивается с обычным методом наименьших квадратов (LS). Во всех расчетах Nr=2.

На рис. 3 представлена частота символьной ошибки (SER) для различных соотношений пилот-сигналов для пространственной модуляции, при заданной скорости пользователя $10\,\text{ м/c}$, Nt = 8 и BPSK. Предложенный метод оценки по корреляции канала значительно ближе к сценарию идеальной информации о канале для Nd=2 и 10. При Nd=20 разница между этими двумя схемами становится меньше.

Заключение

В статье исследовано влияние отношения пилот-сигнал на оценку канала для пространственной модуляции. Корректируя количество

данных со скоростью передачи, можно определить оптимальное соотношение пилот-сигналов для достижения максимальной пропускной способности системы.

Предложенный алгоритм оценки канала на основе корреляции увеличивает пропускную способность пространственной модуляции с более низким оптимальным коэффициентом пилот-сигнала, чем стандартный метод оценки по наименьшим квадратам. Результаты моделирования подтверждают, что предложенный алгоритм является эффективным методом оценки канала с пространственной модуляцией.

Литература

- 1. V-blast: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel / P. Wolniansky, G. Foschini, G. Golden, and R. Valenzuela // Signals, Systems, and Eletronics: 1998 URSI International Symposium. ISSSE 98, 1998. Pp. 295-300.
- 2. Чирков О.Н. Эффективный алгоритм динамического распространения пилот-сигналов для оценки канала радиосвязи в многоантенных системах МІМО с ортогональным частотным уплотнением OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 163-168.
- 3. Методы помехоустойчивого обнаружения сигналов в многоантенных системах МІМО с пространственным мультиплексированием / О.Н. Чирков, М.А. Ромащенко, И.С. Бобылкин, Р.Н. Щипелев, М.И. Соболев // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума, 2019. Т. 2. С. 85-87.
- 4. Чирков О.Н. Актуальные подходы к оценке канала радиосвязи в системе подвижных абонентов с высокой скоростью перемещения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 6. С. 89-93.
- 5. Ромащенко М.А., Панычев С.Н., Чирков О.Н. Оптимальные алгоритмы совместной оценки канала радиосвязи и смещения частоты при многолучевом распространении сигнала // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 156-162.
- 6. Wu X., Renzo M. Di, and Haas H. Channel Estimation for Single-stream MIMO Techniques // 22nd IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC): Fundamentals and PHY Track, 2013.
- 7. MATLAB implementation of the 3GPP Spatial Channel Model (3GPP TR 25.996) / J. Salo, G. Del Galdo, J. Salmi, P. Kyosti, M. Milojevic, D. Laselva, and C. Schneider // Jan. 2005.
- 8. Чирков О.Н., Муратов А.В. Получение OFDM сигналов для высокоскоростных сетей WiMax // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума, 2012. Т. 1. С. 364.
- 9. Чирков О.Н. Повышение помехоустойчивости высокоскоростной беспроводной системы обмена информации WI-FI // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 3. С. 66-67.
- 10. Самодуров А.С., Меркулова Н.В., Кострова В.Н. Влияние абсолютных погрешностей пеленгования на частоту сигнала при размещении четырехэлементной антенной решетки на беспилотном носителе // Радиотехника. 2018. № 7. С. 16-19.

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич - старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-2250-2100

ESTIMATION METHODS OF A CHANNEL WITH SPATIAL MODULATION BASED ON CORRELATION

O.N. Chirkov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers methods for estimating a communication channel with spatial modulation. This type of modulation is a single-stream multiple-input multiple-output (MIMO) technique in which only one transmit antenna is activated at a time. Spatial modulation allows for complete elimination of inter-channel interference, and also demonstrates great energy savings in the RF circuit. However, unlike multi-stream MIMO systems, channel estimation for spatial modulation becomes a problem because a MIMO channel cannot be estimated in a single transmission step on a single stream. Based on this fact, I proposed a new channel estimation scheme that uses channel correlation and jointly estimates channels for different transmit antennas. The proposed method provides the same evaluation period as multithreaded MIMO schemes. The change in the number of transmitted pilot-signals with spatial modulation is investigated for both traditional and new methods of estimation of the communication channel. By balancing accuracy and data volume, an optimal pilot signal ratio can be achieved for maximum channel throughput. Simulation results show that the new scoring approach outperforms the traditional method with a much lower optimal pilot count ratio

Key words: channel estimation, pilot signal, spatial modulation, correlation, MIMO system

References

- 1. Wolniansky P., Foschini G., Golden G., Valenzuela R. "V-blast: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," *Signals, Systems, and Eletronics, 1998 ISSSE 98. 1998 URSI International Symposium*, pp. 295-300
- 2. Chirkov O.N. "An efficient algorithm for dynamic propagation of pilot signals for estimating a radio communication channel in multi-antenna MIMO systems with OFDM orthogonal frequency division multiplexing", *Radio Engineering (Radiotekhnika)* 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 163-168.
- 3. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S., Shchipelev R.N., Sobolev M.I. "Methods of error-correcting signal detection in multi-antenna MIMO systems with spatial multiplexing", *Proc. of the Int. Symp. Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, 2019, vol. 2, pp. 85-87.
- 4. Chirkov O.N. "Actual approaches to the assessment of the radio communication channel in the system of mobile subscribers with a high speed of movement", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 6, pp. 89-93.
- 5. Romashchenko M.A., Panychev S.N., Chirkov O.N. "Optimal algorithms for joint estimation of the radio communication channel and frequency offset in multipath signal propagation", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 156-162.
- 6. Wu X., Di Renzo M., Haas H. "Channel estimation for single-stream MIMO techniques", 22nd IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC): Fundamentals and PHY Track, 2013.
- 7. Salo J., Del Galdo G., Salmi J., Kyosti P., Milojevic M., Laselva D., Schneider C. "MATLAB implementation of the 3GPP Spatial Channel Model (3GPP TR 25.996)", Jan. 2005.
- 8. Chirkov O.N., Muratov A.V. "Obtaining OFDM signals for high-speed WiMax networks", *Proc. of the Int. Symp. Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, 2012, vol. 1, p. 364.
- 9. Chirkov O.N. "Increasing the noise immunity of a high-speed wireless information exchange system WI-FI", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*), 2011, vol. 7, no. 3, pp. 66-67.
- 10. Samodurov A.S., Merkulova N.V., Kostrova V.N. "Influence of absolute direction finding errors on the signal frequency when placing a four-element antenna array on an unmanned carrier", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2018, no. 7, pp. 16-19.

Submitted 16.04.2021; revised 20.08.2021

Information about the author

Oleg N. Chirkov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: chir oleg@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2250-2100

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.015 УДК 621.396

АЛГОРИТМЫ ФОРМИРОВАНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ РАДИОСИГНАЛОВ ВНЕ КОЛЬЦА ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ

С.С. Печников, С.А. Шерстюков

Воронежский институт МВД России, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрен процесс формирования радиосигнала с помощью квадратурного модулятора. Точность осуществления переноса на несущую является критически важным фактором. При передаче информационного сообщения значения сигнала несущей частоты должны принимать соответствующие дискретные значения, согласно закону изменения информационной последовательности, таким образом, формирование неискажённого радиосигнала является одним из основных требований, предъявляемых к работе квадратурного модулятора. При реализации сигналов с угловой модуляцией, как правило, используют генератор, управляемый напряжением. Проанализирована работа квадратурного модулятора и квадратурного фазового модулятора, основанного на формирователях функциональных составляющих модулирующего сигнала. Предложен метод компенсации искажений, возникающих в балансных смесителях и фазовращателе за счет быстроизменяющихся помех, приходящих с выхода высокочастотного генератора или с выхода усилителя мощности по цепи обратной связи, а также медленных отклонений фазы и амплитуды сигнала. Проведено моделирование работы схемы, осуществляющей компенсацию амплитудно-фазовых искажений квадратурного модулятора сигналов угловой модуляции за счёт генерирования компенсационных сигналов. Предложена структурная схема синтеза неискаженного сигнала амплитудно-фазовой модуляции с компенсацией амплитуднофазовой нестабильности квадратурного формирователя, позволяющая осуществлять нелинейное усиление радиосигнала

Ключевые слова: модуляция, квадратурный модулятор, квадратурный фазовый модулятор, компенсация искажений, паразитная модуляция, нелинейный усилитель

Введение

Модулятор осуществляет преобразование одного или нескольких параметров несущего колебания в соответствии с мгновенными значениями модулирующего сигнала [1] и является одним из основных элементов передающего тракта. Параметром качества демодулированного сигнала является частота появления битовых ошибок, которая, в свою очередь, во многом зависит от параметров модулятора.

Отклонение амплитуды и фазы квадратурных составляющих от требуемых значений становится одним из важнейших факторов, вносящих наибольший вклад в значение вектора ошибки. Таким образом, компенсация дисбаланса квадратурных составляющих позволит значительно повысить характеристики системы в целом [2].

На структурной схеме квадратурного модулятора (КВМ), представленного на рис. 1, ИМС – источники модулирующего сигнала, ЛС – линейный сумматор и БМ – балансные модуляторы или балансные смесители, на опорные порты которых генератором несущей частоты (ГНЧ), с помощью фазовращателя на $\pi/2$ (ФВ)

подается четырехфазный ансамбль колебаний со значениями фазы 0°, 90°, 180° и 270°.

В зависимости от порядка следования фаз на входных портах балансных модуляторов и результатов суммирования сигналов на выходе КВМ может быть реализован либо режим амплитудно-фазовой модуляции на промежуточной частоте, либо режим переноса базового спектра модулирующего сигнала на нижнюю или верхнюю боковую полосу [3].

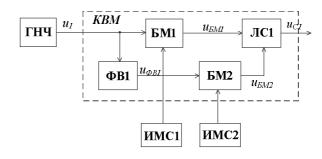


Рис. 1. Схема квадратурного модулятора

Квадратурный модулятор сигналов угловой модуляции

Как правило, при реализации сигналов с угловой модуляцией используют генератор, управляемый напряжением (ГУН) (рис. 2), при

[©] Печников С.С., Шерстюков С.А., 2021

этом источники цифрового модулирующего сигнала (ИЦМС) формируют входную цифровую последовательность a(t),

$$a(t) = \sum_{n = -\infty}^{\infty} a_n \Pi\left(\frac{t - nT_b}{T_b}\right) \tag{1}$$

где $a_n = \pm I$, T_b — длительность бита, $\Pi(t/T_b)$ — прямоугольная функция:

$$\Pi(t/T_b) = \begin{cases} 1, & 0 \le t \le T_b \\ 0 & \text{uhave} \end{cases}$$
(2)

a(t) проходит через соответствующий формирующий фильтр ($\Phi\Phi$) с характеристикой r(t), сигнал на выходе которого:

$$e(t) = \sum_{n = -\infty}^{\infty} a_n r(t - nT_b). \tag{3}$$

Выходной сигнал модулятора с использованием ГУН можно записать как:

$$u_{\Gamma VH}(t) = U \cos[2\pi (f_0 \pm \Delta f)t]. \tag{4}$$

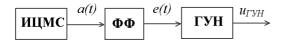


Рис. 2. Схема модулятора на базе ГУН

Универсальность квадратурного модулятора подтверждается возможностью формирования с его помощью сигналов угловой модуляции [4]. На рис. 3 представлена схема квадратурного фазового модулятора (КФМ), где ЦСЧ — цифровой синтезатор частоты, ФФС — формирователь функциональных составляющих, состоящий из ФСС и ФКС — формирователей синусной и косинусной составляющей, выходные сигналы которых имеют соответственно вид $\sin(x)$ и $\cos(x)$ и где x — параметр входного сигнала.

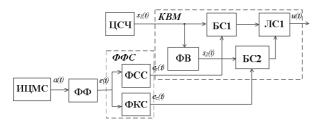


Рис. 3. Схема квадратурного фазового модулятора

В основе построения ФСС и ФКС лежит теория представления в виде рядов Тейлора [5, 6]:

$$f_s(t) = \frac{x}{1!} - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots + (-1)^{n-1} \frac{x^{2n-1}}{(2n-1)!} + \dots,$$
 (5)

$$f_c(t) = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots + (-1)^n \frac{x^{2n}}{2n!} + \dots,$$
 (6)

где $n=0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \dots$ – номера членов ряда, включая нулевой ряд.

Тогда, если на выходе $\Phi\Phi$ получен сигнал $e(t) = m_{\varphi} sin\Omega t$, то с помощью ΦCC и ΦKC формируются сигналы:

$$e_{o}(t) = E\cos[m_{o}\sin\Omega t],$$
 (7)

$$e_{s}(t) = E sin[m_{o} sin\Omega t]. \tag{8}$$

Высокочастотный генератор и фазовращатель на $\pi/2$ формируют квадратурные составляющие:

$$s_1(t) = S\cos\omega t, \tag{9}$$

$$s_2(t) = -S\sin\omega t . ag{10}$$

Перемножив (7) и (9), а также (8) и (10) в балансных смесителях с коэффициентами $k_{\rm 6M}=1$ и сложив их в линейном сумматоре, имеем:

$$u(t) = SE(\cos\omega t \cos[m_{\varphi}\sin\Omega t] - \sin\omega t \sin[m_{\varphi}\sin\Omega t]) =$$

$$= U\cos(\omega t + [m_{\varphi}\sin\Omega t]), \qquad (11)$$

где U=SE — постоянная амплитуда, m_{φ} — индекс фазовой модуляции.

Таким образом, используя данный метод возможно формирование неискаженного ΦM сигнала с произвольным индексом модуляции m_{φ} .

Компенсация амплитудно-фазовых искажений в квадратурном модуляторе сигналов угловой модуляции

Проанализируем алгоритм работы метода компенсации искажений с использованием формируемых компенсационных сигналов. Предложенный метод позволяет устранить искажения, возникающие в балансных смесителях и фазовращателе за счет быстроизменяющихся помех, приходящих с выхода высокочастотного генератора или с выхода усилителя мощности по цепи обратной связи, а также медленных отклонений фазы и амплитуды сигнала.

На рис. 4 представлена схема КФМ, в котором реализован метод компенсации амплитудно-фазовых искажений, где АО – амплитудный ограничитель, АТ – аттенюатор, УМ – усилитель мощности, СФД – синхронный фазовый детектор, АМД – амплитудный детектор, ЛВ – линейный вычитатель. Совокупность элементов АМД, АО, КВМ2, КВМ3, ФВ2, ФФС, ЛВ1 – ЛВ4, ЛС1 и ЛС2 составляет формирователь функциональных составляющих, синтезирующий компенсационные сигналы (ФФСГКС).

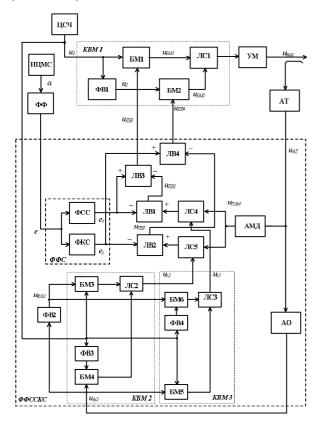


Рис. 4. Схема КФМ с компенсацией амплитудно-фазовых искажений

На выходах ЦСЧ и ФВ1 генерируются квадратурные ВЧ сигналы, аналогичные выражениям (9) и (10), а модулирующий полигармонический сигнал представляет собой:

$$e = \sum_{n=1}^{N} E_n \cos(\Omega_n t + \varphi_n).$$
 (12)

ФСС и ФКС осуществляют соответствующие синусные и косинусные преобразования модулирующего напряжения (12). При этом на выходах ФКС и ФСС напряжения, соответственно, имеют вид:

$$e_{K\Pi} = E \cos \left[m_{\varphi} \sum_{n=1}^{N} E_n \cos(\Omega_n t + \varphi_n) \right], \quad (13)$$

$$e_{CII} = E \sin \left[m_{\phi} \sum_{n=1}^{N} E_n \cos(\Omega_n t + \phi_n) \right]. \quad (14)$$

Перемножив (9) и (13), а также (10) и (14), производится линейное сложение в ЛС1. В результате на выходе при отсутствии дестабилизирующих факторов формируется неискажённый сигнал фазовой модуляции:

$$u_{C1} = kU\cos\omega_0 t \times E\cos\left[m_{\phi}\sum_{n=1}^{N} E_n\cos(\Omega_n t + \phi_n)\right] - kU\sin\omega_0 t \times E\sin\left[m_{\phi}\sum_{n=1}^{N} E_n\cos(\Omega_n t + \phi_n)\right] =$$

$$= U_{C1}\cos\left[\omega_0 t + m_{\phi}\sum_{n=1}^{N} E_n\cos(\Omega_n t + \phi_n)\right], \quad (15)$$

где $U_{CI} = kUE$ – постоянная амплитуда.

При появлении в выходном ФМ сигнале амплитудно-фазовой нестабильности, проявляющейся в виде напряжений u_{nam} и $\Delta \varphi$, и характеризующих, соответственно, паразитной фазовой модуляцией (ПФМ) и паразитной амплитудной модуляцией (ПАМ), начинают отрабатывать цепи обратных связей по следующим алгоритмам [7]. Выражение для ФМ сигнала на выходе УМ, в котором присутствуют ПАМ и ПФМ, можно записать в следующем виде:

$$u'_{C1} = u_{nam} \cos[\omega_0 t + + m_\phi \sum_{n=1}^{N} E_n \cos((\Omega_n t + \phi_n + \Delta \phi)), \qquad (16)$$

где $u_{nam} = U_{CI}(I + U_{nam})$ напряжение ПАМ, $\Delta \varphi$ – напряжение ПФМ.

На выходе АТ мощность ФМ сигнала (16) понижается до значения, обеспечивающего нормальные режимы работы АМД и СФД, которые предназначены для выделения напряжений, соответственно, u_{nam} и $\Delta \varphi$. В результате квадратурных перемножений и линейных суммирований колебаний (17) и (18) в СФД на выходах ЛС2 и ЛС3 будут выделяться, соответственно, синусная и косинусная составляющие модулирующего напряжения, содержащие компоненты ПФМ:

$$e_{C2} = E \sin \left[m_{\varphi} \sum_{n=1}^{N} E_n \cos(\Omega_n t + \varphi_n) \right] + \Delta \varphi_C, \quad (17)$$

$$e_{C3} = E \cos \left[m_{\varphi} \sum_{n=1}^{N} E_n \cos(\Omega_n t + \varphi_n) \right] + \Delta \varphi_K, \quad (18)$$

где $\Delta \varphi_c$ и $\Delta \varphi_\kappa$ — синусная и косинусная составляющие ПФМ.

Далее с напряжениями (17), (18) и u_{nam} последовательно производятся линейные преобразования:

$$e_{\pi C1} = -E \cos \left[m_{\phi} \sum_{n=1}^{N} E_{n} \cos(\Omega_{n} t + \phi_{n}) \right] +$$

$$+E \cos \left[m_{\phi} \sum_{n=1}^{N} E_{n} \cos(\Omega_{n} t + \phi_{n}) \right] + \Delta \phi_{C} + u_{n \alpha M} =$$

$$= \Delta \phi_{K} + u_{n \alpha M}, \qquad (19)$$

$$e_{\pi C2} = -E \sin \left[m_{\phi} \sum_{n=1}^{N} E_{n} \cos(\Omega_{n} t + \phi_{n}) \right] +$$

$$+E \sin \left[m_{\phi} \sum_{n=1}^{N} E_{n} \cos(\Omega_{n} t + \phi_{n}) \right] + \Delta \phi_{C} + u_{n \alpha M} =$$

$$= \Delta \phi_{C} + u_{n \alpha M}, \qquad (20)$$

$$e_{\pi C3} = E \cos \left[m_{\phi} \sum_{n=1}^{N} E_{n} \cos(\Omega_{n} t + \phi_{n}) \right] -$$

$$-(\Delta \phi_{C} + u_{n \alpha M}), \qquad (21)$$

$$e_{\pi C4} = E \sin \left[m_{\phi} \sum_{n=1}^{N} E_{n} \cos(\Omega_{n} t + \phi_{n}) \right] +$$

$$+(\Delta \phi_{C} + u_{n \alpha M}). \qquad (22)$$

В результате выражения (21) и (22) описывают законы изменения управляющих напряжений, представляющие собой алгебраические суммы полезных синусной и косинусной составляющих модулирующего напряжения и паразитных синусной и косинусной составляющих дестабилизирующего напряжения, при этом слагаемые, описывающие ПФМ и ПАМ, для достижения эффекта их полной компенсации подаются на входы БМ1 и БМ2 в противофазе. Из изложенных алгоритмов и структурной схемы на рис. 3 следует, что происходит автокомпенсация ПАМ, и осуществляется формирование неискажённого ФМ сигнала.

Проведем моделирование метода компенсации искажений с использованием генерирования компенсационных сигналов в САПР «Advanced design system» при модулирующем гармоническом напряжении 1 кГц, частоте несущей 100 МГц, индексе фазовой модуляции $m_{\varphi} = \pi/4$. ФСС и ФКС реализуют идеальные преобразования по функциям синуса и косинуса, а дисбаланс фазовращателя на $\pi/2$ составляет 5^0 .

На рис. 5 а) представлены временные формы ΦM сигнала на выходе $K\Phi M$, а на рис. 5 б) квадратурного фазового модулятора с

применением синтезированных компенсационных сигналов.

На рис. 6 представлены выходные спектры сигналов, а на рис. 7 комплексные огибающие сигналов.

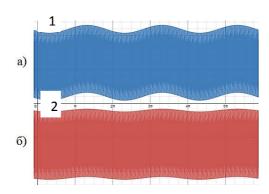


Рис. 5. Временные диаграммы ФМ сигнала: а) на выходе КФМ; б) на выходе КФМ с компенсацией амплитуднофазовых искажений

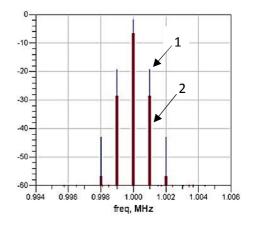


Рис. 6. Спектры ФМ сигналов

На рис. 5, 6 и 7 цифрой 1 обозначены сигналы на выходе КФМ, цифрой 2 на выходе модулятора с применением синтезированных компенсационных сигналов.

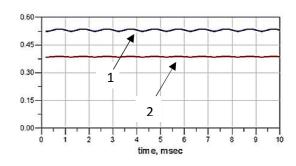


Рис. 7. Комплексные огибающие ФМ сигналов

Формирование узкополосных спектральноэффективных сигналов на базе квадратурных модуляторов сигналов угловой модуляции

Способ осуществления синтеза неискаженного сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией с помощью ФФС и КВМ был предложен ранее [8, 9] и подробно рассмотрен в патенте на изобретение [10]. Данный способ заключается в представлении сигнала с амплитудно-фазовой модуляцией в виде двух фазомодулированных сигналов $u_i(t)$, $u_q(t)$ с постоянной огибающей A и индексом модуляции m_{φ} пропорциональным амплитуде входных синфазной и квадратурной составляющих.

$$u_i(t) = A\cos(\omega t + i(t)) = A\cos(\omega t + m_{\varphi i}\cos\varphi), \quad (23)$$

$$u_{q}(t) = A\cos(\omega t + q(t)) = A\cos(\omega t + m_{\omega q}\sin\varphi)$$
 (24)

Данные преобразования позволяют осуществить нелинейное усиление амплитудно-

фазомодулированного сигнала, обладающего переменной огибающей, с помощью двух нелинейных высокоэффективных усилителей мощности (УМ). Применение метода компенсации искажений с использованием синтезированных компенсационных сигналов позволит ществлять более точные преобразования, учитывающие ошибки, возникающие в результате нелинейного усиления. На рис. 8 представлена формирователя узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов с одновременной компенсацией амплитудно-фазовых искажений, где использованы следующие условные обозначения: источник модулирующей синфазной составляющей I(t) (ИМСС) и источник модулирующей квадратурной составляющей *Q(t)* (ИМКС), усилитель мощности (УМ), квадратурный демодулятор (КВДМ).

Сформированный выходной сигнал U(t) представляет сигнал с амплитудно-фазовой модуляцией, поэтому может быть записан как:

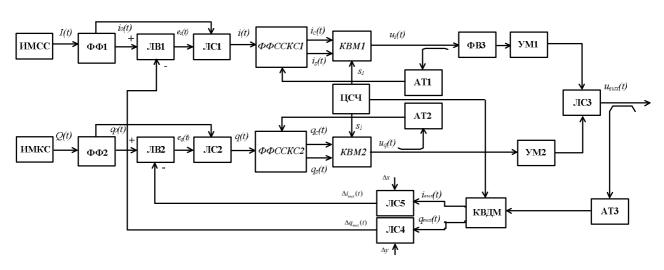


Рис. 8. Схема формирователя узкополосных спектрально-эффективных радиосигналов с одновременной компенсацией амплитудно-фазовых искажений

$$u_{out}(t) = A_{out}(t)cos[\omega t + \varphi_{out}(t)], \qquad (25)$$

тогда синфазная и квадратурная составляющие выходного сигнала:

$$I_{out}(t) = A_{out}(t) \cdot \cos \varphi_{out}(t) =$$

$$=2A\cos\left(\frac{\left[q(t)+\pi/2\right]-i(t)}{2}\right)\cos\left(\frac{\left[q(t)+\pi/2\right]+i(t)}{2}\right),\quad(26)$$

$$Q_{out}(t) = A_{out}(t) \cdot \sin \varphi_{out}(t) =$$

$$=24\cos\left(\frac{[q(t)+\pi/2]-i(t)}{2}\right)\sin\left(\frac{[q(t)+\pi/2]+i(t)}{2}\right). (27)$$

Если исходная синфазная составляющая входного сигнала $i_0(t)$, то выходной сигнал с учетом задержи в тракте обратной связи – $i_{out}(t-\tau)$. Коэффициент усиления усилителей G_i и G_q , а преобразование выходного сигнала в тракте обратной связи с понижением частоты можно рассматривать как линейное затухание с коэффициентом передачи – $1/\beta$.

Формируемые синфазная и квадратурная составляющие сигнала обратной связи:

$$i_{out} \approx \frac{G_i \left\{ \Delta I_{out}(t-\tau) \right\}}{1 + G_i \beta},$$
 (28)

$$q_{out} \approx \frac{G_q \left\{ \Delta Q_{out}(t-\tau) \right\}}{1 + G_a \beta} \,. \tag{29}$$

Демодуляция сформированных сигналов может быть осуществлена с помощью квадратурного демодулятора при внесении дополнительных постоянных составляющих смещения сигнального созвездия по синфазной оси — Δx и квадратурной оси — Δy .

$$\Delta i_{\text{\tiny BMX}}(t) = i_{\text{\tiny BMX}}(t) + \Delta x \,, \tag{30}$$

$$\Delta q_{\text{\tiny RMY}}(t) = q_{\text{\tiny RMY}}(t) + \Delta y \,. \tag{31}$$

В результате сравнения текущих значений входных квадратурных сигналов и квадратурных сигналов обратной связи в ЛВ1 и ЛВ2 формируются сигналы ошибки $e_q(t)$ и $e_i(t)$, которые необходимо добавить к исходным сигналам с помощью ЛС1 и ЛС2 для получения предыскаженных символьных последовательностей:

$$q(t) = q_0(t) + [q_0(t) - \Delta q_{\text{GLX}}(t)],$$
 (32)

$$i(t) = i_0(t) + [i_0(t) - \Delta i_{\text{gapt}}(t)].$$
 (33)

Заключение

Квадратурный модулятор является схемотехническим элементом, позволяющим осуществлять практически все известные способы модуляции. Алгоритмы работы и структурная схема квадратурного формирователя с угловой модуляцией с применением квадратурного модулятора, реализующая использование метода компенсации искажений синтезированными компенсационными сигналами, позволяет эффективно бороться с амплитудно-фазовыми искажениями, имеющими одновременно различные причины возникновения и скорости проявлений.

Литература

- 1. Ходжамурадов Б.А., Янушкевич В.Ф. Методы модуляции и демодуляции видеосигналов с использованием поднесущих частот // Вестник Полоцкого государственного университета. 2016. № 4. С.55-60.
- 2. Абраменко А.Ю. Компенсация дисбаланса квадратурного модулятора // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2011. №2-1 (24). С. 21-24.
- 3. Модуляторы сигналов сверхвысоких частот. Основные классы/ Л. Белов, А. Голубков, А. Кондрашов, А. Карутин // Электроника, наука, технология, бизнес. 2008. №3. С. 76-83.
- 4. Квадратурные формирователи радиосигналов: монография / П.А. Попов, С.А. Шерстюков, Д.А. Жайворонок, В.В. Ромашов. Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2001. 176 с.
- 5. Шерстюков С.А. Моделирование квадратурного фазового модулятора на базе амплитудных модуляторов в квадратурных каналах с аналоговыми функциональными преобразователями в режиме гармонического модулирующего воздействия // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 8. С. 62-68.
- 6. Попов П.А., Никулин С.С. Разработка квадратурных фазовых модуляторов с компенсацией паразитной угловой модуляции и нелинейных искажений // Вестник Воронежского института МВД России. 2010. №1. С. 156-161.
- 7. Шерстюков С.А. Компенсация амплитуднофазовой нестабильности квадратурного формирователя радиосигналов с угловой модуляцией с использованием комбинированных методов управления // Вестник Воронежского института МВД России. 2012. №1. С. 5-9.
- 8. Pechnikov S.S., Sherstukov S.A. Optimization of the Structure of Spectral-Effective Radio Signals on the Basis of Functional Converters and Vector Modulators in the Composition of the Predistortion Tract // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). Svetlogorsk, Russia, 2020. P. 1-5.
- 9. Sherstukov S.A., Pechnikov S.S., Buravtsova A.N. A method of compensating distortion of radio signals with amplitude-phase modulation in a quadrature driver // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. P. 22038
- 10. Заявл. о выдаче пат. Российской Федерации на изобретение от 18.12.2020 № 2020142008. Способ и устройство преобразования структуры спектральноэффективных радиосигналов для усиления в нелинейных усилителях мощности / Печников С.С. М.: ФИПС, 2021.

Поступила 26.05.2021; принята к публикации 19.08.2021

Информация об авторах

Печников Сергей Сергеевич – адъюнкт кафедры инфокоммуникационных систем и технологий, Воронежский институт МВД России (394065, Россия, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53), e-mail: orl_os@mail.ru

Шерстюков Сергей Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий, Воронежский институт МВД России (394065, Россия, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53), e-mail: sherstukov@vimvd.ru

ALGORITHMS FOR THE FORMATION OF NARROW-BAND SPECTRAL-EFFICIENT RADIO SIGNALS OUTSIDE THE RING OF PULSE-PHASE AUTOMATIC FREQUENCY TUNING OF THE FREQUENCY SYNTHESIZER

S.S. Pechnikov, S.A. Sherstyukov

Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Voronezh, Russia

Abstract: the paper considers the process of data transmission over a radio channel by modulating the parameters of the carrier wave with an information signal. When transmitting an information signal, the carrier frequency values must take discrete values in one-to-one correspondence with the information sequence, thus the formation of an undistorted radio signal is one of the main requirements for the operation of a quadrature modulator. The article analyzes the operation of a quadrature modulator and a quadrature phase modulator based on the shapers of the functional components of the modulating signal. We propose a distortion compensation method using synthesized compensation signals, which makes it possible to effectively compensate, firstly, rapidly changing noise inside balanced modulators and phase shifters, and secondly, noise coming along with an input high-frequency signal, for example, from the output of a power amplifier through circuits feedback and, third, slow deviations of amplitudes and phases. We carried out the modeling of the distortion compensation method using synthesized compensation signals

Key words: modulation, quadrature modulator, quadrature phase modulator, distortion compensation, parasitic amplitude modulation, parasitic modulation, nonlinear amplifier

References

- 1. Khodzhamuradov B.A., Yanushkevich V.F. "Methods of modulation and demodulation of video signals using subcarriers", *Bulletin of Polotsk State University (Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2016, no. 4, pp. 55-60.
- 2. Abramenko A.Yu. "Compensation of the imbalance of the quadrature modulator", *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*), 2011, no. 2-1 (24), pp. 21-24.
- 3. Belov L., Golubkov A., Kondrashov A., Karutin A. "Modulators of signals of ultrahigh frequencies. Main classes", *Electronics, Science, Technology, Business (Elektronika, nauka, tekhnologiya, biznes)*, 2008, no. 3, pp. 76-83.
- 4. Popov P.A., Sherstyukov S.A., Zhay-voronok D.A., Romashov V.V. "Quadrature radio signal conditioners" ("Kvadraturnye formirovateli radiosignalov"), monograph, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2001, 176 p.
- 5. Sherstyukov S.A. "Modeling of a quadrature phase modulator based on amplitude modulators in quadrature channels with analog functional converters in the harmonic modulating action mode", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, vol. 5, no. 8, pp. 62-68.
- 6. Popov P.A., Nikulin S.S. "Development of quadrature phase modulators with compensation for parasitic angular modulation and nonlinear distortions", *Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2010, no. 1, pp. 156-161.
- 7. Sherstyukov S.A. "Compensation of the amplitude-phase instability of a quadrature angular modulated radio signal generator using combined control methods", *Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2012, no. 1, pp. 5-9.
- 8. Pechnikov S.S., Sherstukov S.A. "Optimization of the structure of spectral-effective radio signals on the basis of functional converters and vector modulators in the composition of the predistortion tract", 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia, 2020, pp. 1-5.
- 9. Sherstukov S.A., Pechnikov S.S., Buravtsova A.N. "A method of compensating distortion of radio signals with amplitude-phase modulation in a quadrature driver", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*, 2020, pp. 22038.
- 10. Pechnikov S.S. "Method and device for converting the structure of spectral-effective radio signals for amplification in non-linear power amplifiers" ("Sposob i ustroystvo preobrazovaniya struktury spektral'no-effektivnykh radiosignalov dlya usileniya v nelineynykh usilitelyakh moshchnosti"), application for the grant of a patent of the Russian Federation for an invention dated 18.12.2020 no. 2020142008, Moscow, FIPS, 2021.

Submitted 26.05.2021; revised 19.08.2021

Information about the authors

Sergey S. Pechnikov, Associate Professor, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov Avenue, Voronezh 394065, Russia), e-mail: orl os@mail.ru

Sergey A. Sherstyukov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov Avenue, Voronezh 394065, Russia), e-mail: sherstukov@vimvd.ru

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.016 УДК 621.396.677

УЧЁТ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ БОРТОВОЙ АНТЕННЫ ПРИ АНАЛИЗЕ КАНАЛА СВЯЗИ С ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

С.В. Кузьмин, К.О. Коровин, А.В. Андропов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: синтез оптимальной с точки зрения дальности диаграммы направленности является одной из основных задач построения канала связи. Для многих приложений, таких как 2D вторичный локатор, канал связи с БЛА, оптимальной является косекансная диаграмма направленности. В первом приближении антенна, установленная на борту, обладает практически постоянным коэффициентом усиления в направлении на стационарную антенну. Характеристики бортовой антенны получаются из решения задачи в свободном пространстве. Учёт рассеивающих свойств объектов сложной геометрической формы с размерами в десятки длин волн является актуальной, но сложной задачей. При перемещении по поверхности носителя диаграмма направленности бортовой антенны может меняться существенным образом. Современные системы автоматизированного проектирования на основе приближённых численных методов электродинамики позволяют получать характеристики антенн, размещённых на реальных объектах. Ввиду увеличения количества полезных нагрузок на борту не всегда удаётся разместить бортовую антенну в таком месте, которое позволяет пренебречь влиянием геометрии носителя. В результате в диаграмме направленности бортовой антенны появятся интерференционные провалы или минимумы. Дальность работы будет зависеть от перемещения носителя. Рассматривается метод учета характеристик ДН бортовой антенны, позволяющий минимизировать запас на замирания

Ключевые слова: антенная решётка, бортовая антенна, косекансная диаграмма направленности, синтез диаграмм направленности

Введение

При расчете канала связи или дальности работы локатора одним из ключевых аспектов является синтез диаграммы направленности антенны. В настоящее время наиболее часто применяемым аппаратным решением являются фазированные антенные решетки (ФАР), которые позволяют построить ДН заданной формы, оптимальные по заданному критерию [1, 2]. Для канала связи или вторичного локатора наиболее часто используется ДН косекансного типа [3, 4].

Применение такой ДН позволяет уменьшить динамический диапазон сигналов от летательных аппаратов на различных дальностях, обеспечить равномерное покрытие по высоте и дальности с минимальными флуктуациями. Особенности построения антенных решёток с косекансной ДН рассмотрены во многих работах, в частности в [3, 5, 6, 7, 8]. В результате мы должны получить зону действия радиоэлектронного средства, например, в виде, описанном в [9].

В расчёте бюджета радиолинии принимает участие ДН бортовой антенны. Как правило, бортовую антенну при этом характеризуют её

Ку, считая его величину заданной, принимающей значение не менее определённой величины во всём интересующем секторе углов. Однако на практике характеристики ДН могут значительно меняться в зависимости от угла, особенно, с учетом влияния борта. ДН бортовой антенны, которая изначально являлась "гладкой" становится изрезанной со значительными провалами.

Как правило, если есть возможность выбора места размещения бортовой антенны, стараются избежать существенных искажений ДН. Однако в реальных условиях существует ограниченное количество вариантов размещения антенны на борту. Оценить влияние ДН бортовой антенны можно умножив ДН наземной антенны на ДН бортовой с учётом движения носителя относительно неподвижной наземной станции. В результате получим эквивалентную ДН для построения зоны действия РЭС.

Кроме того, при решении задачи синтеза необходимой зоны действия возможно использовать именно эквивалентную ДН. При этом ДН наземной ФАР будет отличаться от косекансной, однако обеспечит компенсацию провалов в ДН бортовой антенны. Данный подход актуален, если выбор места размещения бортовой антенны ограничен, в возможных местах размещения ее ДН существенно искажается.

Результаты

Рассмотрим в качестве примера линию связи с летательным аппаратом (ЛА). Рабочая частота 2500 МГц. Дальность 30 км. Максимальная высота полёта 4000 м. Вертикальная поляризация.

В качестве наземной антенны рассмотрим восьмиэлементную линейную эквидистантную антенную решётку с расстоянием между элементами полдлины волны. Выберем простейшую огибающую для необходимой ДН. До угла, под которым виден носитель при максимальной наклонной дальности (θ_{Dmax}) будет ДН множителя решётки с максимумом в направлении $\theta_{Dmax}/2$, далее её продолжит косекансная ДН, как это показано на рис. 1.

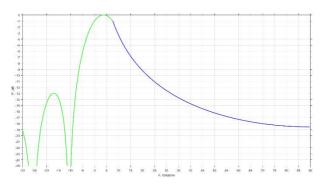


Рис. 1. Требуемая огибающая ДН

Из рис. 1 видно, что косекансная огибающая начинается на уровне минус 1.0 дБ. Для обеспечения заданной зоны действия необходимо скорректировать дальность в направлении максимума ДН. Исходя из зависимости ослабления в свободном пространстве от расстояния, дальность в направлении $\theta_{Dmax}/2$ нужно увеличить до 34 км.

Найдём необходимое амплитудно-фазовое распределение (АФР) для решётки. В качестве ДН излучателя возьмём косинусную ДН со степенью 2.0. Для решения этой задачи воспользуемся генетическим алгоритмом из [10]. Прямые методы синтеза не вполне подходят, поскольку в них работа ведётся с множителем решётки, а учёт ДН излучателя затруднён [11]. Установим дополнительные требования на симметрию амплитудного распределения и антисимметрию фазового распределения. Полученная ДН и соответствующее АФР показаны на рис. 2 и рис. 3. Соответствующая зона действия изображена на рис. 4. Для построения зоны действия использовалась функция [12], функции которой описаны в [9].

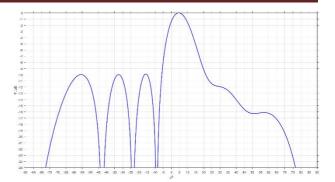


Рис. 2. Косекансная ДН линейной эквидистантной ФАР

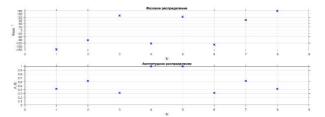


Рис. 3. АФР для формирования косекансной ДН

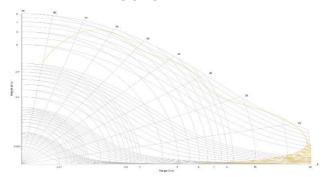


Рис. 4. Зона действия РЭС

Из рис. 4 видно, что требуемая зона действия обеспечивается почти до 70 градусов по азимуту. Далее необходимо применять антенну зенитного излучения.

Получим ДН бортовой антенны в SAVANT [13]. На рис. 5 показана модель существенной части вертолёта, на поверхности которого расположена антенна вертикальной поляризации с определённой ДН.

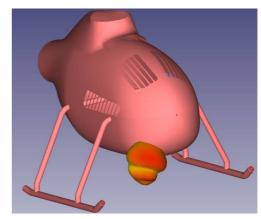


Рис. 5. Модель части вертолёта. Показана трёхмерная ДН антенны с учётом влияния борта

Умножим ДН ФАР на исходную ДН бортовой антенны в угломестной плоскости в области углов, под которыми виден носитель (от 0^0 до 90^0). Полученная ДН и исходная ДН бортовой антенны, на которую производится умножение, показаны на рис. 6. При этом зона действия уменьшится, как показано на рис. 7.

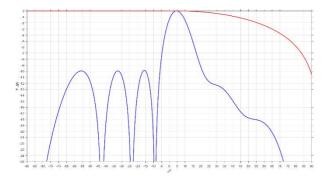


Рис. 6. ДН линейной эквидистантной ФАР (кривая снизу), умноженная на исходную ДН бортовой антенны (кривая сверху) (повёрнута на 5 градусов в направлении земли)

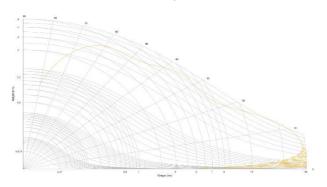


Рис. 7. Зона действия РЭС с учётом исходной ДН бортовой антенны

Теперь учтём влияние носителя на ДН бортовой антенны. Результаты показаны на рис. 8 и рис. 9. Зона действия сокращается ещё больше и наблюдаются существенные провалы.

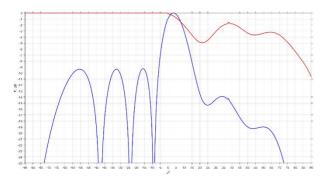


Рис. 8. ДН линейной эквидистантной ФАР (кривая снизу), умноженная на ДН бортовой антенны (кривая сверху) (с учётом влияния носителя)

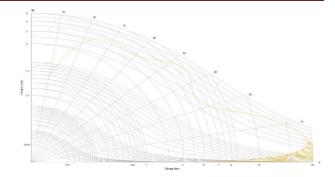


Рис. 9. Зона действия РЭС с учётом ДН бортовой антенны, искажённой в результате дифракции

Если учесть влияние борта при синтезе ДН, то изменится АФР. Результаты показаны на рис. 10-12.

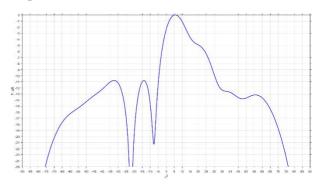


Рис. 10. Квазикосекансная ДН линейной эквидистантной Φ AP, синтезированная с учётом влияния борта

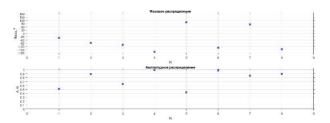


Рис. 11. АФР для формирования квазикосекансной ДН, синтезированной с учётом влияния борта

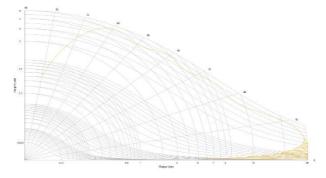


Рис. 12. Зона действия РЭС. При синтезе учтено влияние носителя на бортовую антенну

Из рис. 10 видно, что ДН искажена и является квазикосекансной. Однако искажения, ви-

димые на графике, компенсируют провалы в ДН бортовой антенны, возникшие из-за дифракции на корпусе носителя. В результате получается зона действия, показанная на рис. 12.

Заключение

Методы синтеза ДН постоянно развиваются и совершенствуются, что даёт возможность найти требуемое АФР для антенной решётки наземной станции с учётом как ДН излучателя, так и ДН бортовой антенны. Современные САПР позволяют учесть влияние конструкции носителя на ДН бортовой антенны.

В результате описанной методики на примере радиолинии связи с летательным аппаратом становится возможным:

- Уточнить требования к ДН бортовой антенны.
- Уточнить бюджет радиолинии и обосновать выбор запаса на замирания. На рис. 6 под углом 25 градусов уровень ДН минус 11.5 дБ, а на рис. 8 минус 15.5 дБ. Отсюда следует, что для компенсации недостаточной дальности нужно увеличить бюджет радиоканала не менее чем на 4.0 дБ.
- Снизить требования к антенне зенитного излучения за счёт синтеза квазикосекансной ДН наземной станции.
- Сформировать требования к применению РЭС в случае сильной неравномерности ДН бортовой антенны. Например, установить допустимую ориентацию воздушного судна для достижения необходимого качества связи.

Литература

1. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки; под ред. А.И. Синани. М.: Техносфера, 2012. 558 с.

- 2. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: учеб. пособие для вузов; под ред. Д.К. Воскресенского; изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
- 3. Французов А.Д. Оптимизация антенной решётки с косекансной диаграммой направленности // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2016. № 1. С. 44-50.
- 4. Битаев Е.С. Сверхширокополосная антенная решетка с косекансной характеристикой направленности // Достижения вузовской науки. 2016. № 21. С. 119-124.
- 5. Французов А.Д. Метод неортогональных парциальных диаграмм синтеза линейных антенных решёток // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2014. № 5. С. 3-9.
- 6. Методика синтеза сверхширокополосной линейной печатной антенной решетки с диаграммой направленности заданной формы / А.В. Зайцев, Битаев Е.С., Е.В. Амозов, А.С. Романчук // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 1(29). С. 36-45.
- 7. Антенная решётка с косекансной диаграммой направленности для сканирования в одной плоскости / С. Н. Борисов, С.А. Ганин, А.В. Шишлов, В.Я. Щербенков // Радиотехника. 2012. № 4. С. 92-95.
- 8. Кирпичёва И.А., Останков А.В., Рябчунов А.И. Оптимизация шаблона для повышения эффективности синтеза антенной решетки с косекансной диаграммой направленности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 106-112.
- 9. Blake L.V. Machine Plotting of Radar Vertical-Plane Coverage Diagrams. Washington: Naval Research Laboratory Report 7098, 1970
- 10. Brown A.D. Electronically Scanned Arrays MATLAB Modeling and Simulation, Boca Raton, NW: CRC Press, 2012. 229 p.
- 11. Кузьмин С.В., Коровин К.О., Раимжанов Т.Р. Вариант реализации интерактивного приложения для синтеза систем связи с антенными решетками // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23. № 2. С. 46–54.
- 12. Blakechart URL https://www.mathworks.com/help/phased/ref/blakechart.html (дата обращения 01.03.2021)
- 13. SAVANT URL: https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-savant-technical-features (дата обращения 01.03.2021)

Поступила 29.03.2021; принята к публикации 20.08.2021

Информация об авторах

Кузьмин Сергей Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1), e-mail: sergey-v-kuzmin@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5496-2702

Коровин Константин Олегович – канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой радиосистем и обработки сигналов, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1), e-mail: konstkor@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7979-3725

Андропов Алексей Викторович — аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1), e-mail: mixphixion@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1469-7913

ACCOUNTING THE DIRECTIONAL DIAGRAM OF THE ON-BOARD ANTENNA IN ANALYSIS OF THE COMMUNICATION CHANNEL WITH THE AIRCRAFT

S.V. Kuz'min, K.O. Korovin, A.V. Andropov

Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia

Abstract: the synthesis of the optimal, in terms of range, directional pattern is one of the main tasks of building a communication channel. For many applications, such as a 2D secondary locator, a communication channel with a UAV, the cosecant radiation pattern is optimal. As a first approximation, the on-board antenna has an almost constant gain towards the stationary antenna. The characteristics of the onboard antenna are obtained by solving the problem in free space. Taking into account the scattering properties of objects of complex geometric shapes with dimensions of tens of wavelengths is an urgent but difficult task. When moving over the surface of the carrier, the radiation pattern of the onboard antenna can change significantly. Modern computer-aided design systems based on approximate numerical methods of electrodynamics make it possible to obtain the characteristics of antennas placed on real objects. Due to the increase in the number of payloads on board, it is not always possible to place the onboard antenna in such a place that makes it possible to neglect the influence of the carrier geometry. As a result, interference dips or minima will appear in the directional pattern of the onboard antenna. The operating range will depend on the movement of the media. We considered a method for taking into account the characteristics of the antenna pattern of an airborne antenna, which allows minimizing the margin for fading

Key words: antenna array, airborne antenna, cosecant radiation pattern, synthesis of radiation patterns

References

- 1. Hansen R.S. "Phased antenna arrays", Moscow, Tekhnosfera, 2012, 558 p.
- 2. Voskresensky D.K. ed. "Microwave devices and antennas. Designing phased antenna arrays" ("Ustroystva SVCH i antenny. Proektirovaniye fazirovannykh antennykh reshetok"), textbook, Mosocw, Radiotekhnika, 2012, 744 p.
- 3. Frantsuzov A.D. "Optimization of an antenna array with cosecant directional diagram", *News of Russian Higher Institutions (Izvestiya vuzov Rossii)*, 2016, no. 1, pp. 44-50.
- 4. Bitaev E.S. "Ultra-wideband antenna array with cosecant directional characteristics", *Achievements of High School Science* (Dostizheniya vuzovskoy nauki), 2016, no. 21, pp. 119-124.
- 5. Frantsuzov A.D. "Method of non-orthogonal partial diagrams of synthesis of linear antenna arrays", News of Russian Higher Institutions (Izvestiya vuzov Rossii), 2014, no. 5, pp. 3-9.
- 6. Zaytsev A.V., Bitaev E.S., Amozov E.V., Romanchuk A.S. "Methods for the synthesis of an ultra-wideband linear printed antenna array with a directional diagram of a given shape", *News of Higher Educational Institutions. Volga Region. Technical Science (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki)*, 2014, no. 1 (29), pp. 36-45.
- 7. Borisov S.N., Ganin S.A., Shishlov A.V., Shcherbenkov V.Ya. "Antenna array with cosecant radiation pattern for scanning in one plane", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2012, no. 4, pp. 92-95.
- 8. Kirpicheva I.A., Ostankov A.V., Ryabchunov A.I. "Optimization of the template to improve the efficiency of the synthesis of an antenna array with a cosecant directional pattern", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*), 2020, vol. 16, no. 2, pp. 106-112.
- 9. Blake L.V. "Machine plotting of radar vertical-plane coverage diagrams", Washington, Naval Research Laboratory Report 7098, 1970
 - 10. Brown A.D. "Electronically scanned arrays MATLAB modeling and simulation", Boca Raton, NW, CRC Press, 2012, 229 p.
- 11. Kuz'min S.V., Korovin K.O., Raimzhanov T.R. "A variant of the implementation of an interactive application for the synthesis of communication systems with antenna arrays", *News of Russian Higher Institutions (Izvestiya vuzov Rossii)*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 46-54.
 - 12. Blakechart, available at: https://www.mathworks.com/help/phased/ref/blakechart.html (date of access 03.01.2021)
- 13. SAVANT, available at: https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-savant-technical-features (date of access 03.01.2021)

Submitted 29.03.2021: revised 20.08.2021

Information about the authors

Sergey V. Kuz'min, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications (22 Bolshevikov Ave., St. Petersburg 193232, Russia), e-mail: sergey-v-kuzmin@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-5496-2702

Konstantin O. Korovin, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Associate Professor, Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications (22 Bolshevikov Ave., St. Petersburg 193232, Russia), e-mail: konstkor@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7979-3725

Aleksey V. Andropov, graduate student, Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications (22 Bolshevikov Ave., St. Petersburg 193232, Russia), e-mail: mixphixion@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1469-7913

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.017 УДК 621.396

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

С.М. Фёдоров^{1,2}, Е.А. Ищенко¹, К.А. Бердников¹, Б.А. Шиянов², А.А. Козлова²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия ²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются методы моделирования сложных электродинамических структур, которые состоят из антенны и объекта-носителя, размеры которого превышают 100 длин волн. При выполнении моделирования предлагается рассчитывать характеристики антенны с использованием метода конечного интегрирования, а при установке на платформу-носитель - с использованием метода геометрической дифракции и физической оптики. Развитие современных вычислительных сред позволило реализовать систему гибридного моделирования, которая позволяет достичь высокой производительности, автоматизации и точности результатов полученного моделирования. При выполнении исследования изучалась ситуация с установкой антенны спутникового позиционирования на подводной лодке, причем размеры носителя антенны превышали 800 длин волн, что делало невозможным применение метода конечного интегрирования для решения задачи. Рассматривается три способа решения поставленной задачи: с использованием диаграммы направленности и ее ручным переносом на место планируемой установки антенны, однонаправленного метода гибридного моделирования с применением источника ближнего поля, гибридного моделирования с обратной связью между проектами. Получено, что наибольшую точность обеспечивает метод гибридного моделирования, а также занимает длительное время. Самым скоростным методом является метод гибридного моделирования с однонаправленной связью, так как обеспечиваются автоматизированный расчет и решение поставленной задачи

Ключевые слова: асимптотические методы моделирования, метод конечного интегрирования

Ввеление

Решение электродинамических задач с использованием современного программного обеспечения является важной задачей, что позволяет осуществить решение инженерных задач с высокой точностью. Однако решение сложных задач требует применения мощных вычислительных машин, так как в процессе выполнения решения задачи происходит дискретизация структуры и пространства. Если же геометрические размеры структуры значительно превосходят длины волн, применяются гибридные методы моделирования или асимптотические технологии решения задач.

Методы выполнения электродинамического моделирования

Большинство современных программных пакетов электродинамического моделирования позволяют реализовать ряд вычислителей, которые предназначены для решения задач (рис. 1).

Базовым методом решения электродинамических задач является метод Вейланда [1, 2], (Метод конечного интегрирования (МКИ)), ко-

торый реализован во временном вычислителе (Т на рис. 1). В процессе вычисления характеристик среды на основе уравнений Максвелла в интегральной форме выполняется дискретизация объекта с уплотнением сетки около проводящих поверхностей, что приводит к большому числу ячеек, в которых требуется выполнить расчет. Если размеры структуры очень большие, то вычисление данным методом невозможно с текущим уровнем мощности вычислительных машин.

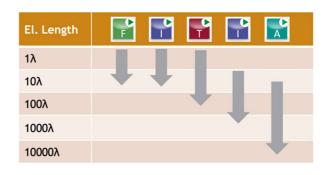


Рис. 1. Зависимость оптимальности применения вычислителя от размеров объекта

Если размеры объекта значительно превосходят 100 длин волн, применяют асимптотический метод решения задачи, в основе которого лежит технология геометрической дифракции и физической оптики (SBR) [2, 3]. Применение

© Фёдоров С.М., Ищенко Е.А., Бердников К.А., Шиянов Б.А., Козлова А.А., 2021

данного метода обусловлено тем, что на больших расстояниях поведение электромагнитных волн начинает подчиняться законам геометрической оптики. Данная технология позволяет с высокой точностью рассчитывать характеристики антенн, которые установлены на крупных объектах [4, 5], а также при расчетах эффективной поверхности рассеяния тел [6, 7].

Для повышения эффективности расчетов применяется гибридный метод решения электродинамического моделирования, который позволяет рассчитать малые компоненты с использованием метода Вейланда, тем самым обеспечив высокую точность расчетов, а моделирование на носителе происходит с использованием асимптотического метода. В гибридном методе выделяют две технологии: однонаправленного моделирования, моделирование с обратной связью.

При выполнении расчетов в однонаправленном режиме полученные результаты расчетов передаются в проект платформы в виде источника ближнего поля, после чего происходит расчет итоговых параметров на основе асимптотического метода.

При моделировании с обратной связью происходит взаимный обмен результатов моделирования между вычислителями, что позволяет учесть дополнительные потери, которые вносит платформа в распространение радиоволн, что позволяет повысить точность расчетов.

Исследуемая задача

В процессе исследования требовалось изучить характеристики антенны спутникового местоположения на основе круговой поляризации, установленной на подводной лодке. Конструкция антенны приводится на рис. 2.

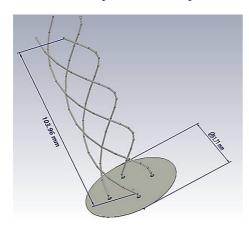


Рис. 2. Модель антенны

Удобство данной антенны состоит в ее малых размерах, что позволяет обеспечить удобную установку и раскладывание на подвижной платформе подводной лодки. Антенна, установленная на носитель, приводится на рис. 3.

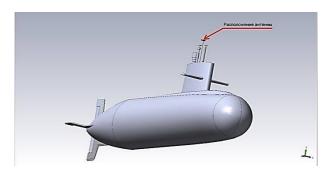


Рис. 3. Модель подводной лодки с установленной антенной

Размеры подводной лодки 150 м, таким образом, если учесть, что длина волны на частоте 1,61 ГГц составляет:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0,186 \text{ m} \tag{1}$$

где λ – длина волны, м;

с – скорость света в вакууме;

f – частота, Гц.

Таким образом, размеры тела составляют 806 λ , использование для решения данной задачи МКИ привело бы к необходимости расчета 51 838 969 572 ячеек, что потребовало бы более 2,5 ТБ оперативной памяти, большой вычислительной мощности, а также моделирование заняло бы большой промежуток времени. Применение же гибридной технологии позволяет снизить нагрузку, так как антенна, рассчитываемая с использованием МКИ, требует для расчета 771 012 ячеек, а подводная лодка при использовании асимптотического вычислителя 6 531 211 отражающих поверхностей. Произведем анализ возможных технологий и методов расчета антенны на носителе.

Моделирование с использованием диаграммы направленности

Первым методом решения поставленной задачи является передача диаграммы направленности из проекта моделирования антенны (отдельно Т-вычислителем) в проект платформы (А-вычислитель) – рис. 4.



Рис. 4. Моделирование базовым методом

Полученные результаты расчета во временном вычислителе (Т) передаются в проект носителя, где методом SBR происходит пересчет диаграммы направленности. На рис. 5 приводятся диаграммы направленности, рассчитанной в проекте антенны, и установленной диаграммы направленности.

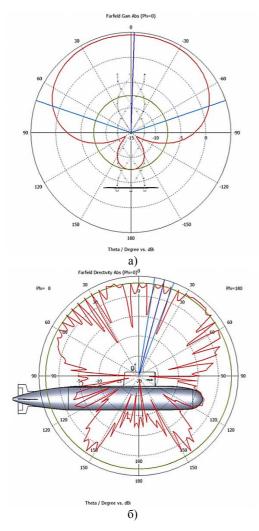


Рис. 5. Полученные диаграммы направленности: а) для антенны без подводной лодки; б) с диаграммой направленности, установленной на подводной лодке

Как видно по полученным результатам, установка антенны приводит к возникновению помех, которые вызваны отражениями и дифракцией электромагнитных волн от корпуса. Также погрешность возникает ввиду выбора шага записи диаграммы направленности при использовании метода SBR, так как сканирова-

ние выполняется с шагом 5 градусов, КНД антенны составил 3,95 дБи.

Удобство данного метода состоит в его быстродействии, однако большим недостатком является наличие двух отдельных проектов моделирования и необходимости ручного переноса результатов и позиционирования на корпусе носителя.

Моделирование с использованием гибридного однонаправленного режима

Применение технологии гибридного однонаправленного режима позволяет достичь автоматизации в передаче результатов из подпроекта моделирования антенны в проект с установленной антенной на ПЛ. В данном случае для моделирования применяются источники ближнего поля (NFS), которые записывают картины Е и Н – компоненты полей на частоте моделирования, на основе чего происходит моделирование методом SBR (рис. 6).



Рис. 6. Алгоритм работы однонаправленного гибридного моделирования

В результате произведенного моделирования в итоговом проекте выполняется построение диаграммы направленности антенны, установленной на подводной лодке (рис. 7).

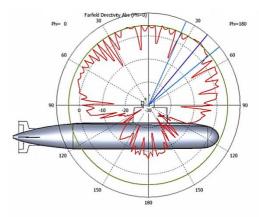


Рис. 7. Диаграмма направленности, полученная с использованием гибридного моделирования в однонаправленном режиме

Как видно на основе полученных результатов, моделирование с использованием источника ближнего поля позволяет повысить точность рас-

четов и эффективность получения результатов, так как моделирование происходит внугри одного проекта на основе собранной итоговой модели. КНД итоговой диаграммы направленности составил 5,14 дБи, неравномерность картины ДН так же, как и в методе, основанном на передаче диаграммы направленности в проект подводной лодки, вызвано шагом просчета в 5 градусов.

Моделирование с использованием гибридного режима с обратной связью

Самым передовым среди методов моделирования сложных электродинамических структур является гибридный метод с обратной связью, что позволяет учитывать в проектах моделирования взаимные помехи, которые вносят платформа, антенна и окружающие компоненты. Схема выполнения моделирования приводится на рис. 8.



Puc. 8. Алгоритм работы гибридного моделирования с обратной связью (Bi-Directional)

Внедрение данного метода моделирования позволяет достичь высокой точности, однако требует большого времени моделирования, так как происходит несколько пересчетов проекта с учетом потерь. Таким образом, удалось достичь результатов, которые приведены на рис. 9.

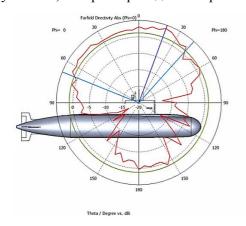


Рис. 9. Диаграмма направленности, полученная с использованием гибридного моделирования с обратной связью

Как видно по полученным результатам, направление излучения антенны определяется отражениями радиоволн, которые возникают от радиорубки подводной лодки, также видно, что данный метод позволяет добиться точности сканирования диаграммной направленности в 1 градус, КНД составил 3,98 дБи.

Благодаря такой высокой точности данный метод является самым перспективным для моделирования сложных электродинамических структур. Однако недостатком данного метода является его время моделирования и зависимость от скорости накопителя данных.

Заключение

В работе было произведено моделирование крупной электродинамической задачи, которая представляет собой размещение антенны для системы спутникового позиционирования на подводной лодке.

Применение современных методов электродинамического моделирования позволит добиться решения задач любой сложности с очень высокой точностью.

Литература

- 1. Weiland T.A. Discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and Communication, 1977, V. 31, Pp. 116-120.
- 2. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М., 2008. 276 с.
- 3. Cong Z., He Z., Chen R. An Efficient Volumetric SBR Method for Electromagnetic Scattering from In-Homogeneous Plasma Sheath // IEEE Access. 2019. Pp. 1-1.
- 4. Kipp R.A., Capoglu I. Extending shooting-and-bouncing rays method with uniform theory of diffraction for installed antennas // 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). 2014. Pp. 2198-2199.
- 5. Fan T., Guo L., Liu W. A Novel OpenGL-Based MoM/SBR Hybrid Method for Radiation Pattern Analysis of an Antenna Above an Electrically Large Complicated Platform // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 16. No 1. Pp. 201-209.
- 6. Smit J.C., Cilliers J.E., Burger E.H. Comparison of MLFMM, PO and SBR for RCS investigations in radar applications // IET International Conference on Radar Systems. 2012. Pp. 1-5.
- 7. Xu W., Guo L., Chai S. Improved SBR Method for Backward Scattering of Ship Target Under Shallow Sea Background // 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. 2018. Pp. 1-4.

Поступила 26.05.2021; принята к публикации 20.08.2021

Информация об авторах

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); доцент кафедры инфор-

мационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9027-6163

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

Бердников Кирилл Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru

Шиянов Борис Анатольевич – канд. техн. наук, профессор, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov sm@mail.ru

Козлова Анастасия Александровна – ассистент, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

HYBRID MODELUNG FOR ELECTRODYNAMIC ANALYSIS OF LARGE-SIZED OBJECTS

S.M. Fyedorov^{1,2}, E.A. Ishchenko¹, K.A. Berdnikov¹, B.A. Shiyanov², A.A. Kozlova²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia ²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses methods for modeling complex electrodynamic structures, which consist of an antenna and a carrier object whose dimensions exceed 100 wavelengths. When performing the simulation, we propose to calculate the characteristics of the antenna using the finite integration method and installed on the carrier platform using the method of geometric diffraction and physical optics. The development of modern computing environments has made it possible to implement a hybrid simulation system, which allows achieving high performance, automation, and accuracy of the results of the simulation. When performing the study, we studied the situation with the installation of a satellite positioning antenna on a submarine, and the dimensions of the antenna carrier exceeded 800 wavelengths, which made it impossible to use the finite integration method to solve the problem. The paper considers three ways to solve the problem posed: using the radiation pattern and its manual transfer to the site of the planned antenna installation, unidirectional hybrid modeling method using a near-field source, hybrid modeling with feedback between projects. We found that the highest accuracy is provided by the method of hybrid simulation with feedback, but its application requires a high speed of the data accumulator, and also takes a long time. The fastest method is the method of hybrid modeling with unidirectional communication, as it provides an automated calculation and solution of the problem

Key words: asymptotic modeling methods, finite integration method

References

- 1. Weiland T.A. "Discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields", *Electronics and Communication*, 1977, vol. 31, pp. 116-120.
 - 2. Bankov S.E., Kurushin A.A. "Electrodynamics and microwave technology for CAD users", Moscow, 2008, 276 p.
- 3. Cong Z., He Z., Chen R. "An Efficient Volumetric SBR method for electromagnetic scattering from in-homogeneous plasma sheath", *IEEE Access*, 2019, pp. 1-1.
- 4. Kipp R.A., Capoglu I. "Extending shooting-and-bouncing rays method with uniform theory of diffraction for installed antennas", 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2014, pp. 2198-2199.
- 5. Fan T., Guo L., Liu W. "A novel OpenGL-based MoM/SBR hybrid method for radiation pattern analysis of an antenna above an electrically large complicated platform", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 201-209.
- 6. Smit J.C., Cilliers J.E., Burger E.H. "Comparison of MLFMM, PO and SBR for RCS investigations in radar applications", *IET International Conference on Radar Systems*, 2012, pp. 1-5.
- 7. Xu W., Guo L., Chai S. "Improved SBR method for backward scattering of ship target under shallow sea background", 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, 2018, pp. 1-4.

Submitted 26.05.2021; revised 20.08.2021

Information about the authors

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9027-6163

Evgeniy A. Ishchenko, 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

Kirill A. Berdnikov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru

Boris A. Shiyanov, Cand. Sc. (Technical), Professor, International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: fedorov sm@mail.ru

Anastasiya A. Kozlova, Assistant, International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: fedorov sm@mail.ru

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.018 УДК 621.98.044.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХКАМЕРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ШТАМПОВКИ

A.Ю. Боташев¹, A.A. Mycaeв²

¹Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Россия ²Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Россия

Аннотация: одной из разновидностей устройств, осуществляющих импульсные методы обработки давлением, являются двухкамерные устройства для листовой штамповки, использующие в качестве энергоносителя газовоздушные топливные смеси. Подача сжатого воздуха в камеру сгорания в рассматриваемом двухкамерном устройстве для листовой штамповки осуществляется компрессором. Проведен анализ термодинамических процессов, протекающих в камере сгорания и рабочем цилиндре двухкамерного устройства для листовой штамповки. При этом установлено, что энергия, затрачиваемая на работу компрессора, составляет около 45% от энергии, выделяющейся в камере сгорания. Получена зависимость для определения термодинамического КПД двухкамерных устройств для листовой штамповки, величина его составляет около 0,25. Установлено, что энергоэффективность двухкамерных устройств не уступает энергоэффективности традиционного штамповочного оборудования, при этом затраты на энергоносители двухкамерных устройств ниже за счет использования дешевого энергоносителя. В двухкамерном штамповочном устройстве для листовой штамповки электрическая энергия, используемая на работу компрессора, составляет менее 1/3 общей потребляемой энергии устройства. Поэтому при прочих равных условиях расходы на энергоносители будут значительно меньше, чем в штамповочном оборудовании, работающем на электрическом токе

Ключевые слова: двухкамерные устройства для штамповки, энергоэффективность штамповочного оборудования

Введение

Приоритетным направлением роста экономики нашей страны является развитие малого бизнеса. Для повышения эффективности предприятий малого бизнеса требуются новые виды технологического оборудования, в частности компактное мощное оборудование, имеющее сравнительно невысокую стоимость. Аналогичными характеристиками обладают импульсные двухкамерные устройства для штамповки [1]. По сравнению с традиционным штамповочным оборудованием [2] эти устройства более компактны, имеют невысокую стоимость и используют сравнительно дешевую штамповую оснастку, что позволяет значительно снизить себестоимость штампованных издеэнергоэффективность лий. Однако устройств недостаточно изучена.

Целью данной работы является оценка энергоэффективности двухкамерных импульсных штамповочных устройств в сравнении с энергоэффективностью традиционного штамповочного оборудования. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи: анализ

термодинамических процессов, совершающихся в двухкамерных импульсных устройствах для штамповки, определение термодинамического коэффициента полезного действия и оценка энергоэффективности этих устройств.

Схема двухкамерного устройства для листовой штамповки

На рис. 1 представлена схема двухкамерного устройства для листовой штамповки [1]. Устройство содержит матрицу с прижимным кольцом, камеру сгорания с форкамерой, снабженной свечей зажигания, и рабочий цилиндр, между которыми расположен поршень с эластичным диском. Камера сгорания и рабочий цилиндр снабжены впускными и выпускными клапанами, они также соединены с воздушным компрессором и баллоном с горючим газом трубопроводами, в которых установлены электропневматические клапаны. В рабочий цилиндр при помощи клапанов подается сжатый воздух. Одновременно в камеру сгорания при помощи клапанов подается горючий газ, а затем посредством клапанов подается сжатый воздух, что приводит к образованию топливной

смеси в камере сгорания и форкамере. Топливная смесь поджигается свечей, одновременно с этим открывается выпускной клапан 7. При этом благодаря наличию форкамеры обеспечивается сгорание топливной смеси в камере сгорания в течение очень короткого времени. Под действием давления продуктов сгорания поршень 4 с эластичным диском 5 ускоренно перемещается, вытесняя сжатый воздух из цилиндра 6 через выпускной клапан 7. При этом благодаря большому проходному сечению клапана 7 давление в цилиндре существенно не увеличивается. При соударении эластичного диска с заготовкой осуществляется процесс штамповки за счет накопленной кинетической энергии поршня.

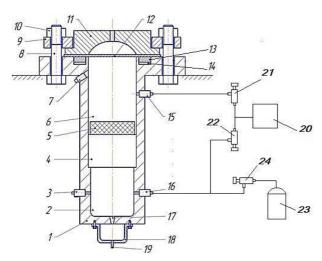


Рис. 1. Схема двухкамерного устройства для листовой штамповки

Оценим энергетические затраты на обеспечение работы устройства для штамповки. Для этого рассмотрим термодинамические процессы, совершающиеся в устройстве штамповки и компрессоре.

При использовании в качестве горючего газа метана или природного газа, состоящего в основном из метана, доля воздуха в топливной смеси составляет около 90%, а при использовании пропана или пропан-бутана доля воздуха составляет не менее 95%. Поэтому термодинамические свойства топливной смеси, в частности удельная теплоемкость, показатель адиабаты, газовая постоянная, существенно не отличаются от термодинамических свойств воздуха. Поэтому при термодинамическом анализе рабочего процесса рассматриваемого устройства будем считать, что рабочим телом является воздух.

В процессе рабочего хода устройства закон изменения давления воздуха в рабочем цилин-

дре зависит от проходного сечения выпускного клапана 7. Подбором его величины можно обеспечить, чтобы давление в цилиндре не увеличивалось выше его первоначального значения.

На рис. 2 представлена диаграмма термодинамических процессов, протекающих устройстве для штамповки и компрессоре. Состояние рабочего тела в камере сгорания перед началом процесса сгорания соответствует точке 1. Подвод теплоты q при постоянном объеме по линии 1-г соответствует процессу сгорания. Расширение газа по линии z-2 соответствует процессу расширения продуктов сгорания при движении поршня. Учитывая быстротечность этого процесса, можно пренебречь теплообменом с окружающей средой и считать процесс по линии z-2 адиабатическим процессом. Площадь фигуры 1'z22'1' равна работе расширения газа в камере сгорания и подпоршневой полости цилиндра, расходующейся на разгон поршня. Воздух, находящийся в надпоршневой полости цилиндра, совершает отрицательную работу, препятствуя движению поршня. Эта работа равна площади прямоугольника 311'2'3. Суммарная работа газов, находящихся под поршнем и над поршнем, которая обеспечивает разгон поршня, равна заштрихованной площади фигуры 1z231.

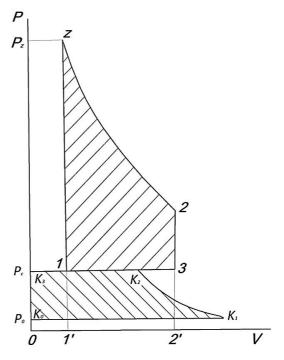


Рис. 2. Диаграмма термодинамических процессов, протекающих в устройстве для штамповки и компрессоре

Горизонтальная линия K_0 - K_1 соответствует процессу всасывания воздуха из окружающей

среды в компрессор. Будем считать, что давление всасывания P_0 равно давлению окружающей среды. Линия K_1 - K_2 соответствует процессу сжатия воздуха в компрессоре до давления P_c . По линии K_2 - K_3 происходит выталкивание сжатого воздуха из полости компрессора. Этот воздух поступает в устройство для штамповки, при этом большая часть воздуха остается в надпоршневой полости цилиндра. Работа, совершаемая компрессором, равна заштрихованной площади фигуры $K_1 K_2 K_3 K_0 K_1$.

Энергетические характеристики процессов, совершающихся в двухкамерном устройстве для листовой штамповки

Основываясь на данную диаграмму, определим энергетические характеристики процессов, совершающихся в данном устройстве. В точке 1 $P=P_c$, $T=T_c$,

где P_c – давление топливной смеси, Па;

 T_c – абсолютная температура топливной смеси, К.

Определим количество теплоты q, передаваемой в камере сгорания на 1 кг рабочего тела. Так как подвод теплоты происходит при постоянном объеме, то

$$q = C_v (T_z - T_c) = C_v T_c (T_z / T_c - 1),$$
 (1)

где C_{ν} - средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания при постоянном объеме, Дж/(кг-K);

 T_{c} , T_{z} - абсолютная температура газа в начале и конце процесса горения, K.

При изохорическом процессе изменение температуры пропорционально изменению давления [3].

$$\frac{T_z}{T_c} = \frac{P_z}{P_c} = \lambda_v,\tag{2}$$

где $P_{_{Z}}$ — давление в конце процесса сгорания, Па;

 $\lambda_{_{\it V}}$ - степень повышения давления при сгорании топливной смеси при постоянном объеме.

Тогда из зависимостей (1) и (2) получим
$$q = C_{\nu}T_{c}(\lambda_{\nu} - 1). \tag{3}$$

Температуру топливной смеси примем равной температуре окружающей среды, т.е. t_c =15 0 C.

Температура продуктов сгорания достигает 2000...2100 $^{\circ}$ С. Исходя из этого, средняя ве-

личина удельной теплоемкости C_{ν} в интервале температур от 0 0 C до 2000 0 C составляет 0,873 кДж /(кг*К) [4].

Для газовоздушных топливных смесей степень повышения давления при сгорании при постоянном давлении составляет 7,5...8,5. Исходя из этого, примем λ_{v} =8. Подставляя эти значения параметров в зависимость (3), получим q=1760,6 кДж/кг.

Таким образом, в камере сгорания на 1 кг рабочего тела подводится 1760,6 кДж.

Общее количество теплоты, переданной рабочему телу в камере сгорания,

$$Q = m_c q \tag{4}$$

где - m_c масса топливной смеси, кг.

Запишем уравнение Клайперона [3] для топливной смеси

$$P_c V_k = m_c T_c R_c \,, \tag{5}$$

где V_k - объем камеры сгорания, м³;

 R_c - газовая постоянная топливной смеси, Дж/(кг*К).

Из зависимости (5) получим

$$m_c = \frac{P_c V_k}{T_c R_c} \,. \tag{6}$$

Из зависимостей (3), (4), (6) будем иметь

$$Q = \frac{C_v}{R} P_c V_k (\lambda_v - 1). \tag{7}$$

Запишем уравнение Майера [3] для топливной смеси

$$C_p = C_v + R_c, (8)$$

где C_p - удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг*К).

Так как $C_p/C_v=k_c$, где k_c - показатель адиабаты топливной смеси, то из уравнения (8) следует

$$\frac{C_v}{R_c} = \frac{1}{k_c - 1}. (9)$$

Из зависимостей (7) и (9) получим

$$Q = \frac{P_c V_k}{k_* - 1} (\lambda_v - 1). \tag{10}$$

Определим работу, совершаемую продуктами сгорания при адиабатическом расширении по линии z-2, используя следующую зависимость [3]:

$$L = \frac{1}{k-1} \left(P_z V_z - P_2 V_2 \right) = \frac{P_z V_\kappa}{k-1} \left(1 - \frac{P_2 V_2}{P_z V_\kappa} \right), \quad (11)$$

где P_2, V_2 - давление и объем газа в конце процесса расширения;

k - показатель адиабаты продуктов сгорания.

Объем продуктов сгорания в конце процесса расширения равен сумме объемов камеры сгорания и цилиндра V_u , т.е.

$$V_2 = V_{\nu} + V_{\mu} \,. \tag{12}$$

Обозначим

$$\delta = \frac{V_2}{V_\nu} = 1 + \frac{V_u}{V_\nu},\tag{13}$$

где δ – степень расширения продуктов сгорания.

Учитывая зависимости (13), на основании известных соотношений адиабатического процесса [3] можно записать:

$$\frac{P_2}{P_z} \frac{V_2}{V_\kappa} = \left(\frac{V_\kappa}{V_2}\right)^k \frac{V_2}{V_\kappa} = \frac{1}{(V_2/V_\kappa)^{k-1}} = \frac{1}{\delta^{k-1}} \,. \tag{14}$$

Используя зависимости (2) и (14), зависимость (11) можно представить в следующем виде

$$L = \frac{\lambda_{\nu} P_c V_{\kappa}}{k - 1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{k - 1}} \right). \tag{15}$$

Из этой зависимости следует: с увеличением величины δ повышается работа, совершаемая продуктами сгорания. Однако при этом увеличиваются габаритные размеры устройства для штамповки, поэтому рациональные значения δ составляют 3,5...4.

Определим работу, совершаемую воздухом, находящимся в цилиндре

$$L_{\scriptscriptstyle \theta} = P_{\scriptscriptstyle c} (V_2 - V_{\scriptscriptstyle K}) = P_{\scriptscriptstyle c} V_{\scriptscriptstyle K} (\delta - 1)$$
 (16)

Эта работа направлена на снижение скорости движения поршня. Поэтому суммарная работа, совершаемая продуктами сгорания и возлухом

$$L_{\Sigma} = L - L_{e} = \frac{P_{c}V_{\kappa}}{k - 1} \left[\lambda_{\nu} \left(1 - \frac{1}{\delta^{k - 1}} \right) - (k - 1)(\delta - 1) \right]$$
(17)

Определим теперь энергию, затрачиваемую на работу компрессора.

Работа, совершаемая компрессором на сжатие и подачу 1 кг воздуха, определяется следующей зависимостью [3]:

$$l_{\kappa} = \frac{n}{n-1} P_{\kappa_{1}} v_{\kappa_{1}} \left[\left(\frac{P_{\kappa_{2}}}{P_{\kappa_{1}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \tag{18}$$

где P_{κ_1} - давление в начале процесса сжатия, Па;

 $P_{\kappa_{\lambda}}$ - давление в конце процесса сжатия, Па;

 v_{κ_1} - удельный объем воздуха в начале процесса сжатия, м³/кг;

n - показатель политропы сжатия.

Будем считать, что P_{κ_1} равно давлению окружающей среды, а v_{κ_1} равен удельному объему воздуха окружающей среды. Согласно с международной стандартной атмосферой

$$P_{\kappa_1} = 101330\Pi a$$
; $v_{\kappa_1} = 0.816 \,\mathrm{m}^3/\mathrm{kr}$.

Давление в конце процесса сжатия равно давлению топливной смеси, т.е. $P_{\kappa_2} = P_c$. Давление топливной смеси не превышает 0,8 МПа, тогда

$$P_{K_2}/P_{K_1} = P_{C}/P_{K_1} \approx 0.8/0.1 = 8$$
.

В процессе сжатия воздух в компрессоре охлаждается [3], с учетом этого примем n=1,2. Тогда, подставляя принятые значения параметров в зависимость (18), получим $l_{\kappa} \approx 200$ кДж/кг. Таким образом, работа компрессора для сжатия и подачи в камеру сгорания 1 кг воздуха не превышает 200 кДж. Однако воздух подается не только в камеру сгорания, но и в цилиндр. Суммарный объем камеры сгорания и цилиндра согласно зависимости (13) в б раз превышает объем камеры сгорания. Предельное значение δ составляет 4. Следовательно, работа компрессора для подачи воздуха в камеру сгорания и цилиндр $l_{\kappa_{\Sigma}} = 4l_{\kappa} = 800 \, \text{кДж}.$ Сравним энергию, затрачиваемую на работу компрессора, с энергией, подводимой к рабочему телу в камере сгорания:

$$l_{\kappa_{\rm x}}/q = 800:1760,6 = 0,45$$
.

Отсюда можно заключить, что энергия, затрачиваемая на работу компрессора, составляет 45% от энергии, подводимой к рабочему телу в камере сгорания. Тогда затраты энергии на работу компрессора можно учесть введением поправочного коэффициента, т.е. умножением на 1,45 величины Q, вычисленной по зависимости (10). Исходя из этого, термодинамический коэффициент рабочего процесса двухкамерного устройства для штамповки можно определить как

$$\eta_t = \frac{L_{\Sigma}}{1.45O}. (19)$$

Тогда из зависимостей (10), (17), (19) получим

$$\eta_t = \frac{k_c - 1}{1,45(k - 1)(\lambda_v - 1)} \left[\lambda_v \left(1 - \frac{1}{\delta^{k - 1}} \right) - (k - 1)(\delta - 1) \right] . (20)$$

Показатель адиабаты продуктов сгорания k можно принять равным 1,28 [4]. Тогда, учитывая ранее принятые значения $k_c = 1,4$, $\lambda_v = 8$,

 $\delta=4$, по зависимости (20) получим $\eta_t=0.25$. Таким образом, термодинамический коэффициент полезного действия двухкамерных устройств для штамповки составляет около 25%.

Сравним КПД двухкамерного устройства для штамповки с КПД традиционных видов штамповочного оборудования. Существующие виды штамповочного оборудования, например кривошипные прессы, гидравлические прессы, работают на электрическом токе. КПД тепловых электростанций по выработке электрического тока составляет 0,33...0,35 [3], примем $\eta_{_{9}}=0,35$. В линиях передачи электрического тока, в трансформаторах и других устройствах теряется 20...25% электрической мощности, примем $\eta_{_{nep}}=0,8$. КПД электродвигателя составляет 0,85...0,93 [5], примем $\eta_{_{дв}}=0,9$.

Между электродвигателем и штамповочным оборудованием стоит, по меньшей мере, один редуктор. В зависимости от вида редуктора его КПД составляет 0,90...0,97 [6], примем $\eta_{\rm p}=0,95$. Исходя из этого, КПД штамповочного оборудования, работающего на электрическом токе, можно определить как

 $\eta_{_{\rm III}} = \eta_{_9} \cdot \eta_{_{\Pi \rm ep}} \cdot \eta_{_{\rm JB}} \cdot \eta_{_p} = 0.35 \cdot 0.8 \cdot 0.9 \cdot 0.95 \approx 0.24.$

Следовательно, энергоэффективность двухкамерного импульсного устройства для штамповки сопоставима с энергоэффективностью существующих видов штамповочного оборудования.

При этом следует отметить, что в двухкамерном устройстве затраты на энергоносители меньше, чем затраты на энергоносители традиционного штамповочного оборудования. Это связано с тем, что стоимость газообразного топлива во много раз меньше стоимости электрической энергии. Стоимость энергоносителей различна в регионах РФ. Поэтому рассмотрим на примере Московской области. Стоимость 1 кВт ч электрической энергии составляет 5,73 рублей [7]. При мощности 1 кВт за 1 час выделяется 3600 кДж энергии. Тогда стоимость 1 кДж энергии составляет 5,73:3600=0,00159 руб.=0,159 коп.

Стоимость 1 м³ природного газа составляет 5,96 руб. [8]. Теплотворная способность природного газа составляет [8] 35600...36700 кДж/м³, примем ее равной 36000 кДж/м³. Тогда стоимость 1 кДж теплотворной способности газа составляет:

5,96:36000=0,0001656 руб.=0,01656 коп.

Следовательно, соотношение 1 кДж электрической энергии и тепловой энергии составляет 0,159:0,01656=9,6.

Таким образом, стоимость электрической энергии в 9,6 раз дороже стоимости тепловой энергии. Возможно в других регионах РФ это соотношение меньше, но, безусловно, 1 кДж тепловой энергии во много раз дешевле 1 кДж электрической энергии.

В двухкамерном штамповочном устройстве электрическая энергия, используемая на работу компрессора, составляет менее 1/3 общей потребляемой энергии устройства. Поэтому при прочих равных условиях расходы на энергоносители будут значительно меньше, чем в штамповочном оборудовании, работающем на электрическом токе.

Выводы

В результате проведенного анализа определены энергетические характеристики термодинамических процессов, протекающих в двух-камерных устройствах для штамповки. При этом установлено следующее.

- 1. Энергия, затрачиваемая на работу компрессора, составляет не более 45% энергии, выделяющейся в камере сгорания при сгорании топливной смеси.
- 2. Термодинамический коэффициент полезного действия двухкамерного устройства для штамповки составляет около 0,25, что сопоставимо с КПД существующего штамповочного оборудования.
- 3. Энергоэффективность двухкамерного штамповочного устройства не уступает энергоэффективности существующих видов штамповочного оборудования, при этом затраты на энергоносители в двухкамерном устройстве значительно меньше за счет использования дешевого энергоносителя.

Литература

- 1. Исследование двухкамерного устройства для листовой штамповки /А.А. Мусаев, С.М. Ногамирзаев, Б.Х. Голтаков, И.И. Козлова //Молодежь, наука, инновации: материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. Грозный: ГГНТУ, 2019. С.43-48.
- 2. Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник. М.: МГТУ им. Баумана, 2006. 560 с.
- 3. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Лебедченко О.С. Теплотехника: учебник / под ред. С.В. Пузача. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Академия ГПС МЧС России, 2019. 502 с.
- 4. Шароглазов Б.А., Фарафонтов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: учебник. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. 403 с.

- 5. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2007. 350 с.
- 6. Плотников П.Н., Недошивина Т.А. Детали машин: расчет и конструирование: учеб. пособие / науч. ред. В.И. Брезгин. Екатеринбург: Издательство Уральского

университета, 2016. 236 с.

- 7. Тарифы на электроэнергию по Московской обл. на 2021г. URL: https://www.mosenergosbyt.ru/individuals/tariffs-n-payments/tariffs-mo/polnaya-versiya-tarifov-mo.php
- 8. Тарифы на газ по Московской обл. на 2021г. URL: https://energo-24.ru/tariffs/gaz/gaz2021/13639.html

Поступила 19.05.2021; принята к публикации 19.08.2021

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

Мусаев Абубакар 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 Абубакаровича Исаева, 100), e-mail: brain 95@mail.ru

RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY OF TWO-CHAMBER PULSE DEVICES FOR STAMPING

A.Yu. Botashev¹, A.A. Musaev²

¹North-Caucasian State Academy, Cherkessk, Russia ²Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia

Abstract: one of the types of devices that carry out pulse methods of pressure treatment are two-chamber devices for sheet stamping, using gas-air fuel mixtures as an energy carrier. The supply of compressed air to the combustion chamber in the considered two-chamber device for sheet stamping is carried out by a compressor. We carried out the analysis of thermodynamic processes taking place in the combustion chamber and the working cylinder of a two-chamber device for sheet stamping. We found that the energy spent on the operation of the compressor is about 45% of the energy released in the combustion chamber. We obtained the dependence for determining the thermodynamic efficiency of two-chamber devices for sheet stamping; its value is about 0.25. We established that the energy efficiency of two-chamber devices is not inferior to the energy efficiency of traditional stamping equipment, while the energy costs of two-chamber devices are lower due to the use of a cheap energy carrier. In a two-chamber die-forging device for sheet metal stamping, the electrical energy used to operate the compressor is less than 1/3 of the total energy consumption of the device. Therefore, all other things being equal, the cost of energy carriers will be significantly less than in stamping equipment operating on electric current

Key words: two-chamber stamping device, stamping equipment energy efficiency

References

- 1. Musaev A.A., Nogamirzaev S.M., Goltakov B.Kh., Kozlova I.I. "Study of a two-chamber device for sheet stamping", *Youth, Science, Innovation: Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conf. (Molodezh', nauka, innovatsii: materialy VIII Vseros. nauch.-prakt. konf.)*, GGNTU, Grozny, 2019, pp. 43-48.
- 2. Zhivov L.I., Ovchinnikov A.G., Skladchikov E.N. "Forging and stamping equipment" ("Kuznechno-shtampovochnoe oborudovanie"), textbook, Moscow, Bauman MSTU, 2006, 560 p.
- 3. Puzach S.V., Koshmarov Yu.A., Lebedchenko O.S. "Heat engineering" ("Teplotekhnika"), textbook, Moscow, Academy of State Fire Service EMERCOM of Russia, 2019, 502 p., ISBN 978-5-9229-0165-9.
- 4. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'ev V.V. "Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes" ("Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschot protsessov"), textbook, Chelyabinsk, SUSU, 2005, 403 p.
- 5. Voldek A.I., Popov V.V. "Electric machines. AC machines" ("Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka"), text-book, St. Petersburg, Piter, 2007, 350 p.
- 6. Plotnikov P.N., Nedoshivina T.A. "Details of machines: calculation and construction" ("Detail mashin: raschet i konstruirovanie"), textbook, Ekaterinburg, Ural University Publishing House, 2016, 236 p.
- 7. Electricity tariffs for the Moscow region for 2021, available at: https://www.mosenergosbyt.ru/individuals/tariffs-n-payments/tariffs-mo/polnaya-versiya-tarifov-mo.php
 - 8. Gas tariffs in the Moscow region for 2021, available at: https://energo-24.ru/tariffs/gaz/gaz2021/13639.html

Submitted 19.05.2021; revised 19.08.2021

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

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.019 УДК 531.374; 539.213

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ СБОРНЫХ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕФОРМИРУЮЩИХ ПРОТЯЖЕК

Я.Б. Немировский¹, И.В. Шепеленко¹, С.Е. Шейкин², Ю.А. Цеханов³, Ф.Й. Златопольский¹, О.И. Попова³, М.И. Попова³

¹Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина ²Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина ³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: разработан алгоритм и проведена оценка прочности сборных твердосплавных элементов со сплошной и дискретной рабочими поверхностями. Получены зависимости, позволяющие установить связь между конструктивными параметрами сборных деформирующих инструментов и их прочностью. Выполнены прочностные расчеты деформирующего инструмента для обработки отверстий значительного диаметра со сплошной и дискретной рабочими поверхностями. Численным моделированием, методом конечных элементов получены распределения эквивалентных напряжений в элементах инструмента и контактных напряжений по поверхности контакта твердосплавная вставка—корпус, что позволило проанализировать прочность инструмента под нагрузкой. Определены конструктивные параметры инструмента и приведены алгоритмы последовательности расчета сборных деформирующих элементов (ДЭ). Разработан алгоритм последовательности расчета сборного ДЭ для дискретного протягивания. Предложенная конструкция сборного рабочего элемента позволяет не только улучшить обрабатываемость изделия резания, но и уменьшить расход остродефицитного твердого сплава по сравнению с твердосплавным ДЭ аналогичных размеров на 6 кг. Полученные результаты можно использовать в инженерных расчетах при проектировании сборного инструмента для дискретного деформирования, а также для оценки прочности сборных инструментов, например, фрез, зенкеров, разверток при уточнении внешних нагрузок

Ключевые слова: протяжка, деформирующий элемент, дискретное протягивание, твердый сплав, прочность элемента

Введение

Деформирующее протягивание с твердосплавными рабочими элементами эффективно применяется при обработке отверстий в изделиях значительной номенклатуры из различных конструкционных материалов и сплавов [1, 2].

Однако высокая стоимость твердого сплава и существующий дефицит его основных составляющих вольфрама и кобальта указали на ряд проблем по их применению. Одна из них возникает при обработке отверстий большого диаметра (свыше 150 мм). В этом случае каждый деформирующий элемент протяжки требует для своего изготовления значительное количество твердого сплава, что, естественно, увеличивает его себестоимость. Кроме того, возникают трудности технологического характера при изготовлении пресс-форм, а также при прессовании значительных объемов твердосплавной смеси.

Постановка задачи

Задачу успешной замены твердосплавных элементов пытались решить многие исследователи. Так, например, была предпринята попытка создания рабочих элементов деформирующих протяжек из закаленных сталей с изностойкими покрытиями различных марок на их рабочей поверхности [3,5]. Также предлагалось изготавливать деформирующие элементы (ДЭ) из безвольфрамовых твердых сплавов [4]. Однако, как показали исследования, такие инструменты по своим эксплуатационным характеристикам значительно уступали твердосплавным ДЭ.

Одним из путей снижения расхода твердого сплава при изготовлении рабочих элементов протяжек является использование сборных деформирующих элементов, которые состоят из двух частей — рабочей твердосплавной и стальной, на которой размещена рабочая часть [6].

Однако рекомендаций по расчету прочности и выбору конструкционных параметров таких составных ДЭ недостаточно, и они имеют противоречивый характер. Следует отме-

[©] Немировский Я.Б., Шепеленко И.В., Шейкин С.Е., Цеханов Ю.А., Златопольский Ф.Й., Попова О.И., Попова М.И., 2021

тить, что в работах [6, 7] отмечается повышение прочности таких сборных элементов.

Известно несколько подходов по оценке прочности ДЭ протяжек. Самым распространенным является методика [6, 7], согласно которой сплошной твердосплавный ДЭ рассматривается как балка на упругом основании. Но ряд допущений, принятых для данной схемы, не позволяет объективно оценить прочность составных элементов. Другой подход для оценки прочности ДЭ основан на применении метода конечных элементов [8, 9].

Авторами работы [9] с помощью МКЭ исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) сборного элемента. Однако полученные данные нуждаются в обобщении и в разработке алгоритма оптимизации конструкции инструмента.

Кроме элементов со сплошной рабочей поверхности существуют конструкции ДЭ, выполняющие дискретное деформирование. Например, такие элементы успешно используются при комбинированном протягивании отверстий в гильзах из серого модифицированного чугуна. При этом обработка осуществляется протяжкой, включающей последовательно размещенные деформирующие и режущие элементы [10, 11]. ДЭ осуществляет дискретное деформирование конкретных участков поверхности гильзы. Этот способ решил проблему дробления кольцевой стружки, что позволило использовать высокоэффективную по производительности операцию протягивания взамен существующих операций растачивания и хонингования при обработке полости гильзы двигателя.

Однако методику расчета на прочность твердосплавных элементов со сплошной рабочей поверхностью [9] нельзя использовать для расчета элементов с прерывистой рабочей поверхностью.

Целью представленной работы являются уточнение предшествующих методик и разработка алгоритма последовательности расчета и оптимизации конструкции инструмента.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- на основе известного анализа НДС рабочего элемента со сплошной рабочей поверхностью установить влияние конструкционных параметров инструмента на его прочность и разработать алгоритм оптимизации конструкции инструмента;
- выполнить анализ НДС деформирующего инструмента с дискретной рабочей поверх-

ностью, установить влияние конструктивных параметров инструмента на его прочность и разработать алгоритм оптимизации конструкции инструмента;

привести примеры последовательности расчета сборных твердосплавных элементов со сплошной и дискретной рабочими поверхностями

Результаты работы

Сборный элемент со сплошной рабочей поверхностью (рис. 1) состоит из стальной основы 3, внешнего тонкостенного твердосплавного кольца 1 высотой L и толщиной стенки H.

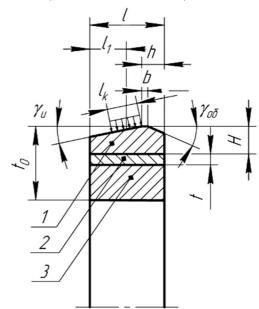


Рис. 1. Сборный деформирующий элемент: 1 – твердосплавное кольцо; 2 – кольцо из легкоплавкого материала; 3 – стальное кольцо

Он имеет рабочий конус с углом $\gamma_{\rm u}$, цилиндрическую ленточку длиной b и обратный конус с углом γ_{oo} . Однако неточности отверстия твердосплавного кольца, которые возникают при его спекании, могут привести даже к разрушению твердосплавной части инструмента при его сборке. Поэтому в работе [9] рекомендуется стальную 3 и твердосплавную 1 части выполнить с гарантированным зазором размером t, который после сборки этих частей заполняется легкоплавким сплавом 2 (рис. 1).

Для получения расчетной модели, учитывающей влияние конструкционных параметров инструмента на прочность твердосплавной части, использовался многофакторный план модельного эксперимента, приведенного в работе [9]. В расчетах варьировались различные

конструктивные параметры: H, l, t, t0, а также l1 (рис. 1). Для сокращения объема вычисления варьируемые параметры выбирались безразмерными, отнесенными к соответствующему параметру элемента, согласно теории подобия [9]. Для каждого варианта расчетов по критерию Писаренко — Лебедева с учетом масштабного эффекта определялась величина эквивалентного напряжения σ_9 по всему объему элемента и его максимальное значение.

Для исследования влияния конструктивных параметров на прочность инструмента для дискретного деформирования рассмотрим сборный инструмент (рис. 2).

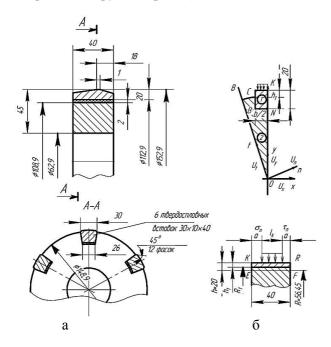


Рис. 2. Деформирующий элемент протяжки: а – общий вид; б – расчетная схема; 1 – вставка из твердого сплава ВК15; 2 – корпус ДЭ из стали 40XH

Он состоит из стального корпуса и твердосплавных вставок, закрепленных в нем пайкой.

Общий вид и расчетная схема представлена на рис. 2. Вследствие симметрии конструкции и условий нагрузки расчетная схема включает 1/6 стального корпуса и 1/2 твердосплавной вставки.

Конечно-элементная дискретизация ДЭ приведена на рис. 3. При расчетах считалось, что корпус и твердосплавные вставки деформируются упруго, а вставка сопрягается с корпусом без зазора. Вследствие линейности решаемой упругой задачи расчет σ_9 выполнялся для единичной внешней нагрузки.

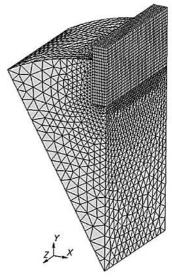


Рис. 3. Конечно-элементная дискретизация деформирующего элемента протяжки

Оценивалось влияние высоты выступания вставки над поверхностью корпуса на возникающие в ней и в корпусе эквивалентные напряжения. Для этого варьировались соответственно значения R и h1.

Кроме того, рассматривалось влияние расположения длины зоны контакта ДЭ с деталью относительно расстояния от торцов инструмента а на величину σ_3 .

Физико-механические свойства материалов, которые использовались при расчетах, приведены в таблице.

Физико-механические свойства материалов, которые использовались при расчетах

1			
Наименование	Модуль Юнга, ГПа	Коэф. Пуассона	$\sigma_T = \sigma_{0,2}$
Твердый сплав ВК15 (Вставка)	554	0,225	3,37
Сталь 40XH (Корпус)	210	0,30	0,60

В этом случае для исследования предельного состояния эквивалентные напряжения рассчитывались по двум критериям прочности: удельной потенциальной энергии формоизменения в виде $\sigma_e^{IV} = \sigma_i$ и максимальных касательных напряжений в виде:

$$\sigma_e^{III} = \sigma_1 - \sigma_3 \le 2 \left[\tau\right] = \sigma_{0,2}.$$
 (1)

Расчеты выполнялись с использованием рекомендаций и расчетного комплекса, описанных в работе [12].

Проведем анализ НДС сборного твердосплавного элемента со сплошной рабочей поверхностью.

В работе [9] показано, что опасная область находится у внутренней поверхности твердосплавного кольца. Однако для очень тонких наружных твердосплавных слоев эти опасные области появляются и на наружной поверхности инструмента.

В то же время на изменение максимального σ_3 , рассчитанного по критерию Писаренко – Лебедева, практически не влияет толщина алюминиевой прослойки. Таким образом, изменение безразмерной толщины промежуточного слоя t/d1 (рис. 1) от 0 до 0,075 практически не влияет на прочность наружного твердосплавного кольца. Поэтому в расчетах его влияние можно не учитывать. Влияние иных конструктивных и геометрических параметров также приведено работе [9].

Статистической обработкой результатов расчета, приведенного в [9], получена формула для определения значения $\sigma_{_9}^{max}$ в зависимости от конструктивных и геометрических параметров инструмента.

$$\sigma_{9}^{\text{max}} = 0.6 \cdot \lambda \cdot q \cdot (3.5 + 14.5) \frac{l_k}{l} \cdot f(\bar{t}_o) \cdot f\left(\frac{H}{t_o}\right) \cdot f\left(\frac{t_o}{l}\right)$$
, (2)

где H — толщина твердосплавного слоя; t_o — толщина деформирующего элемента; l — ширина деформирующего элемента; l_k — ширина

зоны контакта; $\bar{t}_o = \frac{t_o}{r_l}$; r_l — внутренний радиус отверстия инструмента; λ — коэффициент, учитывающий форму эпюры нормальных контактных напряжений.

Согласно [9], $\frac{\sigma_n^{\max}}{\sigma_n^{\min}}$ определяется по зави-

симости (3):

$$\lambda = e^{0.01} \left(\frac{\sigma_n^{\text{max}}}{\sigma_n^{\text{min}}} \right)^2 , \qquad (3)$$

где σ_n^{\max} и σ_n^{\min} соответственно максимальное и минимальное значения эпюры нормальных контактных давлений.

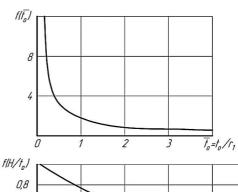
Величина контактного давления q, входящая в зависимость (2), определяется в зависимости от параметров технологического процесса согласно методике, приведенной [6].

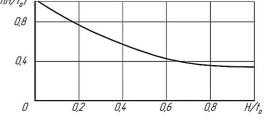
Приравнивая выражение (2) к пределу прочности на растяжение твердого сплава (таблица), получим зависимость для определе-

ния конструктивных параметров сборного элемента. Часть из них могут задаваться технологическими, конструктивными условиями. Остальные вычисляются по графикам (рис. 4). Из них можно определить следующие конструктивные параметры: t_0/r_1 , H/t_0 , t_0/l . Пара-

метр $\frac{l_k}{l}$ определяется согласно зависимости (4).

$$\sigma_{9} = (3.5 + 14.5) \frac{l_{\kappa}}{l}$$
 (4)





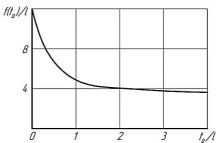


Рис. 4. Зависимости f(t0/r1), f(H/t0), f(t0/l) для определения при проектировании сборного инструмента

Таким образом, анализ данных работы [9] позволил получить инженерную расчетную зависимость для определения оптимальных конструктивных параметров сборного инструмента. Погрешность расчета по данной зависимости составляет $\pm 5\%$.

Проведем анализ НДС сборного твердосплавного элемента с дискретной рабочей поверхностью.

Пример результатов расчета в виде распределения эквивалентных напряжений по

критериям прочности $\sigma_{_{\mathfrak{I}}}^{III}$ И $\sigma_{_{\mathfrak{I}}}^{IV}$ приведен на рис. 5.

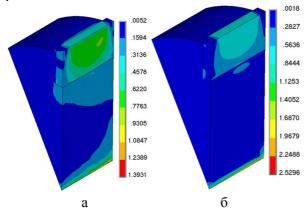


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений при нагрузке в ДЭ: а – (МПа); $6 - (M\Pi a)$: h1=2 мм, R1=74.45 мм

Более подробные результаты по распределению $\sigma_{\mathfrak{p}}^{III}$ и $\sigma_{\mathfrak{p}}^{IV}$ в различных частях сборного инструмента приведены в работе [14].

С учетом рекомендаций работы [9], толщину этого слоя выбираем до 2 мм, что применимо для процесса пайки.

Расчетным путем исследовалось влияние на σ_3 такого конструктивного фактора, как величина выступания вставки над поверхностью корпуса. Она регламентируется двумя параметрами: относительной высотой выступания h_I/h и радиусом корпуса R_I (рис. 2). Диапазон варьирования этих параметров приведен в таблице.

Расчеты позволили получить для $\sigma_{\!\scriptscriptstyle 3}$ следующую зависимость:

$$\sigma_{3} = 0.5 + 1.25 \frac{h_{1}}{h}.$$
 (5)

Для корпуса σ_9 описывается такой аппроксимацией:

$$\sigma_e = 0.125 + 0.94 \frac{h_1}{h}.$$
 (6)

Влияние длины контакта на σ_9 практически незаметно, если протяженность контакта симметрична краям вставки. Расчеты показали, что при замене симметричной нагрузки на ассиметричную (a=0, a=l-2a, рис. 2, б) значение σ_9 увеличивается до 30%. Следовательно, при проектировании инструмента оптимальным вариантом конструкции является симметричное расположение площади контакта относительно торцов инструмента.

Проведем оценку конструкционной прочности сборного твердосплавного элемента и пример его расчета.

Полученные результаты поведения сборных деформирующих элементов под нагрузкой использовались для разработки методики оценки их конструкционной прочности, необходимой для практического использования.

Диаметр стержня протяжки и, соответственно, сопрягаемый со стержнем диаметр отверстия инструмента может выбираться по известной методике (О.А. Розенберг) из конструктивных соображений и из условия прочности.

Далее рассмотрим определение конструктивных параметров инструмента по зависимости (2). Они определяются по (4) и по графикам (рис. 4).

Эти параметры следующие: высота элемента l=40 мм, общая толщина стенки сборного элемента t_0 =40 мм, толщина твердосплавного кольца Н=10 мм, толщина компенсирующей прослойки из алюминия t=2 мм, диаметр отверстия под стержень d_1 =62,9 мм, наружный диаметр стального термообработанного кольца из стали 40XH d_2 =128,9 мм. Внутренний диаметр твердосплавного кольца d_3 =132,9 мм, наружный диаметр твердосплавного кольца d_4 =152,9 мм. Участок контактной нагрузки находится симметрично его торцов. Угол рабочего и обратного конуса - 5°. Остальные размеры элемента и технические требования его изготовления принимаем согласно рекомендациям [6].

Подставим значения геометрических размеров кольца в формулу (6), определим максимальные эквивалентные напряжения в твердосплавной части инструмента под нагрузкой $\sigma_{_{9}}^{\text{max}}$ =630 МПа.

Запас прочности по критерию Писаренко – Лебедева [7]:

$$n = \frac{\sigma_p}{\sigma_p^{\text{max}}} = \frac{1800}{630} = 2.8$$

Таким образом, спроектированный сборный деформирующий инструмент удовлетворяет условиям прочности. Алгоритм последовательности расчета сборного ДЭ со сплошной рабочей поверхностью приведен на рис. 6.

Масса твердосплавной части этого элемента составляет 2,7 кг. В то же время масса цельного элемента аналогичных размеров почти 10 кг, что свидетельствует о существенной экономии твердого сплава. Изготавливается

спроектированный элемент по стандартной технологии [6].



Рис. 6. Алгоритм последовательности расчета сборного ДЭ со сплошной рабочей поверхностью

Данные математического моделирования поведения сборного ДЭ для дискретного деформирования под нагрузкой используем для разработки методики оценки его прочности, необходимой для проектирования инструмента.

Обозначим эквивалентные напряжения, например, по III теории прочности, рассчитанной для единичной контактной нагрузки $\overline{\sigma}_n = 1$, как $\sigma_{\mathfrak{P}}^{III}$. Тогда на основе линейности упругой задачи $\sigma_{\mathfrak{P}}^{III}$ равно:

$$\sigma_{\mathfrak{I}}^{III} = \overline{\sigma}_{\mathfrak{I}}^{III} \cdot \sigma_{\mathfrak{I}}. \tag{7}$$

Условие прочности для твердосплавной ставки имеет вид:

$$\sigma_{\mathfrak{I}}^{III} \leq [\sigma],$$
 (8)

где допустимое напряжение:

$$\left[\sigma\right] = \frac{\sigma_{\scriptscriptstyle B}}{n},\tag{9}$$

n — коэффициент запаса прочности.

Тогда из зависимости (7) с учетом (8) и (9) получим зависимость для определения допустимой контактной нагрузки:

$$\sigma_n = \frac{[\sigma]}{\sigma_3^{III}} \tag{10}$$

Для твердого сплава ВК15 σ_e =3370 МПа. Коэффициент запаса прочности n с учетом циклического характера действия нагрузки n=1,5 [13]. Для твердосплавной вставки, как следует из выражения (4), максимальная проч-

ность обеспечивается соотношением $h_1/h\approx0,1,$ при этом действующие эквивалентные напряжения $\overline{\sigma}_{_9}^{II}=0,63$

Тогда из (7) с учетом (8) и (9) получаем σ_n =3566 МПа \approx 3,6 ГПа. Это значение допустимого контактного давления на твердосплавную часть инструмента. Величина действующих контактных давлений определяется по известной методике [6], используемой для ДЭ в виде колец, по известной силе протягивания, площади контакта для дискретного инструмента, геометрии его рабочей части и соответствующего значения коэффициента трения.

Для корпуса максимальное значение прочности в зависимости от величины выступания вставки над корпусом определяется исходя из зависимости (5) и соответствует значению $h_1/h\approx 0.1$. При этом значение $\sigma_2=0.22$. Определим максимальное значение контактного давления, допускаемого из условий прочности материала корпуса. Корпус изготовлен из термообработанной стали 40ХН, для которой $\sigma_{\rm B}$ =1400 МПа, коэффициент запаса прочности с учетом циклического характера действия нагрузки n=1,5. Тогда из зависимости (10) с учетом (8) и (9) получаем значение $\sigma_3 = 4.2 \Gamma \Pi a$. Сравнение действующих контактных нагрузок и допустимых показало, что прочность стального корпуса будет обеспечена.

Таким образом, полученные в результате моделирования зависимости (4) и (5) позволяют определить необходимый конструктивный параметр – высоту выступания твердосплавного элемента над корпусом, исходя из определения допустимого контактного давления по зависимости (10).

Для примера рассмотрим расчет на прочность ДЭ для дискретного протягивания, который является составной частью комбинированной прошивки (рис. 7). Этим инструментом обрабатывается гильза из серого модифицированного чугуна твердостью НВ230.

Обработка выполняется блоком, содержащим размещенные последовательно деформирующий 2 и режущий 3 элементы. Для улучшенной обрабатываемости чугуна режущим элементом 3 сборный деформирующий элемент 2 выполняет дискретное деформирование с помощью твердосплавных вставок 4. При срезании дискретно-деформированного слоя режущим элементом 3 кольцевая стружка в местах сопряжения деформированного и недеформированного участков разрушается на

элементы 5 и легко удаляется из полости гильзы.

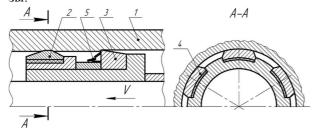


Рис. 7. Обработка гильзы из чугуна деформирующережущей прошивкой

Исходные данные для расчёта и проектирования сборного инструмента с дискретной рабочей поверхностью. Обрабатываемая деталь: гильза из серого модифицированного чугуна размерами d_0 =152, $7^{+0.1}$ мм, толщиной стенки t_0 =10 мм. Наружный диаметр сборного элемента для дискретного протягивания D=152,9 мм. Количество вставок из твердого сплава BK15 - 6, размеры вставок из твердого сплава BK15 - 6, размеры вставок 40×20×40. Натяг на ДЭa=0,15 мм. Площадь контакта с учетом площади вставок S=196 мм 2 . Осевая сила протягивания ДЭ равна Q=45 кH, действующее контактное давление q=1,35 ГПа.

Исходя из конструкторских расчетов, принимаем $h_1/h=0,15$. Тогда по зависимости (5) $\sigma_3=0,69$. Для твердого сплава ВК15 [σ]=2,25 ГПа. Тогда согласно зависимости (10), допустимая контактная нагрузка будет равна: $\sigma_n=[\sigma]/0,69=3,2$ ГПа, что удовлетворяет условиям прочности.

На основании вышеизложенного материала разработан алгоритм последовательности расчета сборного ДЭ для дискретного протягивания (рис. 8).



Рис. 8. Алгоритм последовательности расчета сборного ДЭ для дискретного протягивания

Предложенная конструкция сборного рабочего элемента позволяет не только улучшить обрабатываемость изделия резания, но и уменьшить расход остродефицитного твердого сплава по сравнению с твердосплавным ДЭ аналогичных размеров на 6 кг.

Заключение

- 1. Разработан алгоритм и проведена оценка прочности сборных твердосплавных элементов со сплошной и дискретной рабочими поверхностями, заключающаяся в анализе НДС указанных элементов и оценке влияния конструктивных параметров инструментов на их прочность.
- 2. Получены зависимости, позволяющие установить связь между конструктивными параметрами сборных деформирующих инструментов и их прочностью. Это позволило оптимизировать конструктивные параметры сборных элементов со сплошной рабочей поверхностью по параметрам: толщины твердосплавного кольца H/t_0 , ширины кольца t_0/l , расположения контактной зоны l_1/l , ее протяженности l_k/l и формы эпюры контактной нагрузки; а с дискретной рабочей поверхностью по параметрам: высоты выступания вставки над корпусом, расположения площадки контакта относительно торцов инструмента.
- 3. Выполнены прочностные расчеты деформирующего инструмента для обработки отверстий значительного диаметра со сплошной и дискретной рабочими поверхностями. Определены конструктивные параметры инструмента и приведены алгоритмы последовательности расчета сборных деформирующих элементов.

Литература

- 1. Nemyrovskyi Y., Posvyatenko E., Sardak S. Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching // Advances in Design, Simulation and Manufacturing. 2019. II. P. 238–247. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6 24
- 2. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / отв. ред. П.Р. Родин. Киев: Наук. думка, 1990. 320 с.
- 3. Применение износостойких покрытий на рабочих элементах деформирующих протяжек/ О.А. Розенберг, Я.Б. Немировский, С.Е. Шейкин, З.Г. Власюк // Сверхтвердые материалы. 1987. № 1. С. 36–41.
- 4. Розенберг А.М., Лобанова Л.В., Полотняк С.Б. Расчет на прочность деформирующих элементов протяжек // Повышение эффективности протягивания. 1986. С. 157–169
- 5. Розенберг О.А., Царенко И.М. О работоспособности инструмента с детонационным покрытием для деформирующего протягивания// Сверхтвердые материалы. 1991. №4. С.43–48.

- 6. Расчет и проектирование твердосплавных деформирующих протяжек и процесса протягивания/ А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Э.К. Посвятенко и др. Киев: Наукова думка, 1978. 256 с.
- 7. Посвятенко Е.К., Немировський Я.Б., Шепеленко І.В. Протягування та протяжний інструмент. Кропивницький, 2020. 298 с.
- 8. Немировский Я.Б., Деревец Л.И., Полотняк С.Б. Влияние геометрии деформирующего элемента на его прочность// Сверхтвердые материалы. 2004. № 2. С. 60–65
- 9. Лавриков С.А., Рукин А.Ю. Конечно-элементное моделирование статических и динамических линейных и нелинейных термомеханических процессов в трехмерных конструкциях произвольной формы на персональных ЭВМ FEM_TOOLS // Каталог. Программные продукты Украины. ТЕХНО. 1994. С. 54.
- 10. Studenets S.F., Yeromin P.M., Chernyavsky O.V. Influence of deformation conditions during the machining of hard-alloy combined broaches on the structure and hardening

- of the surface layer of cast irons// Superhard materials. 2015. N_24 . P. 91–99.
- 11. Механіка комбінованого протягування графітовмісних чавунів/ Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, О.В. Чернявський, П.М. Єрьомін. Кропивницький, 2017. 286 с.
- 12. Полотняк С.Б. Методика чисельного моделювання процесів мартенситних фазових перетворень у малих обсягах матеріалів при деформуванні на алмазних ковадлах// Сверхтвердые материалы. 2008. №2. С.13–28.
- 13. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наукова думка, 1984. 328 с.
- 14. Designing the structures of discrete solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength/ Ya. Nemyrovskyi, I. Shepelenko, E. Posviatenko, Yu. Tsekhanov, S. Polotnyak, S. Sardak, V. Bandura, Yu. Paladiichuk// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol.3. No 7 (105). P. 57–65. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203524

Поступила 25.05.2021; принята к публикации 20.08.2021

Информация об авторах

Немировский Яков Борисович - д-р техн. наук, профессор, Центральноукраинский национальный технический университет (25006, Украина, г. Кропивницкий, пр. Университетский, 8), e-mail: provotorova1951@gmail.com

Шепеленко Игорь Витальевич - канд. техн. наук, доцент, Центральноукраинский национальный технический университет (25006, Украина, г. Кропивницкий, пр. Университетский, 8), e-mail: kntucpfzk@gmail.com

Шейкин Сергей Евгеньевич - д-р техн. наук, заведующий отделом формирования прецизионных элементов сложнопрофильных изделий, старший научный сотрудник, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины (04074, Украина, г. Киев, ул. Автозаводская, 2), e-mail: Sheykin2003@ukr.net

Цеханов Юрий Александрович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: tsekhanov@yandex.ru

Златопольский Федор Йосипович - д-р техн. наук, профессор, Центральноукраинский национальный технический университет (25006, Украина, г. Кропивницкий, пр. Университетский, 8), e-mail: kntudmpmzfj@ukr.net

Попова Ольга Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: olga_10_popova@mail.ru

Попова Маргарита Ивановна — канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: vip.popovamargarita@mail.ru

DESIGN FEATURES OF CARBIDE ASSEMBLY WORKING ELEMENTS OF DEFORMING BROACHES

Ya.B. Nemirovskiy¹, I.V. Shepelenko¹, S.E. Sheykin², Yu.A. Tsekhanov³, F.Y. Zlatopolskiy¹, O.I. Popova³ M.I. Popova³

¹Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukrain
²Institute of Superhard Materials. V.N. Bakul National Academy of Sciences of Ukraine,
Kiev, Ukraine
³Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we developed an algorithm and assessed the strength of prefabricated carbide elements with solid and discrete working surfaces. We obtained dependencies that make it possible to establish a relationship between the design parameters of prefabricated deforming tools and their strength. We performed strength calculations of the deforming tool for machining holes of significant diameter with solid and discrete working surfaces. We obtained the distributions of equivalent stresses in the elements of the tool and contact stresses over the contact surface of the hard-alloy insert - body by numerical modeling, by the finite element method, which made it possible to analyze the strength of the tool under load. We determined the design parameters of the tool and here we give algorithms for the sequence of calculation of prefabricated deforming elements (DE). We developed an algorithm for the sequence of calculating the prefabricated DE for discrete broaching. The proposed design of the prefabricated working element allows not only to improve the machinability of the cutting product but also to reduce the consumption of an acutely deficient hard alloy in comparison with a hard alloy DE of similar dimensions by 6 kg. The results obtained can be used in engineering calculations when designing a prefabricated tool for discrete deformation, as well as for assessing the strength of prefabricated tools, for example, cutters, countersinks, reamers when specifying external loads

Key words: broach, deforming element, discrete broaching, carbide, element strength

References

- 1. Nemyrovskyi Y., Posvyatenko E., Sardak S. "Technical-economic aspects of the use of technological process of deforming broaching", *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II*, 2019, pp. 238–247. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6 24.
- 2. Rosenberg A.M., Rosenberg O.A., ed. Rodin P.R. "Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and deforming broaching" ("Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya v protsessakh rezaniya i deformiruyushchego protyagivaniya"), Kiev, Naukova Dumka, 1990, 320 p.
- 3. Rosenberg O.A., Nemirovskiy Ya.B., Sheikin S.E., Vlasyuk Z.G. "Application of wear-resistant coatings on working elements of deforming broaches", *Superhard Materials (Supertyyerdye materialy)*, 1987, no. 1, pp. 36–41.
- 4. Rosenberg A.M., Lobanova L.V., Polotnyak S.B. "Calculation of the strength of the deforming elements of broaches", *Improving Broaching Efficiency (Povyshenie effektivnosti protyagivaniya)*, 1986, pp. 157-169.
- 5. Rosenberg, O. A., Tsarenko I.M. "On the operability of the tool with a detonation coating for deforming broaching", *Superhard Materials (Supertvyerdye materialy)*, 1991, no. 4, pp. 43–48.
- 6. Rosenberg A.M., Rosenberg O.A., Posvyatenko E.K. et al. "Calculation and design of hard-alloy deforming broaches and broaching process" ("Raschet i proektirovanie tverdosplavnykh deformiruyushchikh protyazhek i protsessa protyagivaniya"), Kiev, Naukova Dumka, 1978, 256 p.
 - 7. Posvyatenko E.K., Nemirovskiy Ya.B., Shepelenko I.V. "Stretching out that long tool", Kropyvnytskyi, 2020, 298 p.
- 8. Nemirovsky Ya.B., Derevets L.I., Polotnyak S.B. "Influence of the geometry of the deforming element on its strength", *Superhard Materials (Supertyyerdye materialy)*, 2004, no. 2, pp. 60–65.
- 9. Lavrikov S.A., Rukin A.Yu. "Finite element modeling of static and dynamic linear and nonlinear thermomechanical processes in three-dimensional structures of arbitrary shape on personal computers FEM_TOOLS", *Catalog. Software products of Ukraine*, TECHNO, 1994, 54 p.
- 10. Studenets S.F., Yeromin P.M., Chernyavsky O.V. "Influence of deformation conditions during the machining of hard-alloy combined broaches on the structure and hardening of the surface layer of cast irons", *Superhard Materials*, 2015, no. 4, pp. 91-99
- 11. Posvyatenko E.K., Nemirovskiy Y.B., Chernyavskiy O.V., Yryomin P.M. "Mechanics of combined drawing of graphite from small chavuns", Kropyvnytskyi, 2017, 286 p.
- 12. Polotnyak S.B. "Method of numerical modeling of processes of martensitic phase transformation in small materials during deformation on diamond kovadly", *Superhard Materials (Supertvyerdye materialy)*, 2008, no. 2, pp. 13–28.
- 13. Loshak M.G. "Strength and durability of hard alloys" ("Prochnost' i dolgovechnost' tverdykh splavov"), Kiev, Naukova dumka. 1984. 328 p.
- 14. Nemyrovskyi Ya., Shepelenko I., Posviatenko E., Tsekhanov Yu., Polotnyak S., Sardak S., Bandura V., Paladiichuk Yu. "Designing the structures of discrete solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, vol.3, no. 7 (105), pp. 57-65. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203524.

Submitted 25.05.2021; revised 20.08.2021

Information about the authors

Yakov B. Nemirovsky, Dr. Sc. (Technical), Professor, Central Ukrainian National Technical University (8 Prospect Universitetskiy, Kropyvnytskyi 25006, Ukraine), e-mail: provotorova1951@gmail.com

Igor' V. Shepelenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Central Ukrainian National Technical University (8 Prospect Universitetskiy, Kropyvnytskyi 25006, Ukraine), e-mail: kntucpfzk@gmail.com

Sergey E. Sheikin, Dr. Sc. (Technical), Head of the Department of Formation of Precision Elements of Complex-Profile Products, Senior Researcher, Institute of Superhard Materials. V.N. Bakul National Academy of Sciences of Ukraine (2 Avtozavodskaya st., Kiev 04074, Ukraine), e-mail: Sheykin2003@ukr.net

Yuriy A. Tsekhanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: tsekhanov@yandex.ru

Fyedor Y. Zlatopolsky, Dr. Sc. (Technical), Professor, Central Ukrainian National Technical University (8 Prospect Universitetskiy, Kropyvnytskyi 25006, Ukraine), e-mail: kntudmpmzfj@ukr.net

Ol'ga I. Popova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: olga_10_popova@mail.ru

Margarita I. Popova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: vip.popovamargarita@mail.ru

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.020 УДК 621.01

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ С ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ДЛЯ ПОЛЫХ ШАРИКОВ

А.В. Панфилова, А.В. Королев, О.П. Решетникова, Б.М. Изнаиров, А.Н. Васин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Аннотация: рассматриваются результаты проведения экспериментальных исследований способа удаления окалины с поверхности стального листового проката. Предложен новый способ и устройство для очистки поверхности листового проката от окалины режущими пластинами, вращающимися вокруг оси, перемещающейся поступательно вдоль обрабатываемой поверхности. Пластины наклонены в направлении вектора вращения на угол до 10 градусов и упруго поджимаются к обрабатываемой поверхности. Это обеспечивает возможность в процессе очистки поверхности воспроизводить макронеровности листового проката. Приведены результаты экспериментальных исследований, построены математические и графические зависимости, описывающие влияние факторов процесса на эффективность очистки поверхности проката. Показано, что наиболее значимое влияние на параметр оптимизации оказывает сила воздействия инструмента на поверхность заготовки. Причем это влияние реализуется в прямо пропорциональной зависимости. Другие исследованные факторы, а именно: угол наклона пластины, скорость ее вращения и подача, оказывают значительно меньшее влияние на степень очистки проката. Эти исследования были необходимы с точки зрения определения конструктивных параметров силовых элементов как технологической оснастки, реализующей указанный способ, так и технологической установки в целом. План эксперимента был принят, исходя из реальных производственных возможностей индустриального партнера, и соответствовал классическим представлениям теории резания. Описанные результаты дают возможность планировать дальнейшие эксперименты по изучению направлений использования данного способа

Ключевые слова: полые шарики, экспериментальные исследования, окалина, режимы обработки, технологические факторы, регрессионная зависимость, момент сопротивления, степень влияния

Благодарности: статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук № MK-2395.2020.8

Введение

В последние годы все большее внимание уделяется новым направлениям в разработке высокоскоростных транспортных систем, особенно в авиационной и космической промышленности. Когда скорости перемещения летательных аппаратов достигают 15-20 махов и более, то требуется новый подход к конструктивному исполнению используемых в них подшипниковых узлов. Одним из таких направлений является применение в высокооборотистых подшипниках облегченных тел качения, например, в виде полых шариков. Для производства полых шариков чаще всего используется стальной листовой прокат. Как известно, окалина, возникающая в результате листового проката стали, является большой проблемой для дальнейшего его использования [1, 2]. Поэтому эффективная очистка от окалины его поверхности является задачей, которую нужно решать комплексно наряду с технологией изготовления заготовок полых шариков и их дальнейшей механической обработкой.

В статье [3] показаны результаты проведения экспериментальных исследований влияния режимов обработки на эффективность удаления окалины способом [4], предложенным одним из авторов статьи. Позднее авторами были проведены дополнительные экспериментальные исследования влияния режимов обработки на момент сопротивления вращению инструмента при очистке проката для полых шариков от окалины. Эти исследования были необходимы с точки зрения определения конструктивных параметров силовых элементов как технологической оснастки, реализующей указанный способ, так и технологической установки в целом.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием инструмента (устройства), изображенного на рис. 1, на рис. 2 показана фотография инструмента, изготовленного авторами. Устройство состоит из кор-

© Панфилова А.В., Королев А.В., Решетникова О.П., Изнаиров Б.М., Васин А.Н., 2021

пуса 2, держателя устройства 1, пружины 3, режущей пластины 4 и элементов крепления режущей пластины 5, 6 и 7. Для более эффективного удаления окалины и повышения стойкости инструмента режущая пластина выбирается из твердого сплава.

Инструмент закреплялся в шпинделе вертикально-фрезерного станка 6P12 (рис. 2). Шпиндель станка вместе с инструментом поворачивался на угол 1-2 градуса к вертикальной оси станка.

В качестве оснастки использовались машинные тиски, в которых устанавливался экспериментальный образец в виде прямоугольной пластины, покрытой окалиной. Пластина вырезалась из стандартного листового проката.

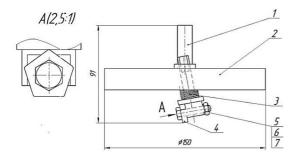


Рис. 1. Схема устройства для удаления окалины



Рис. 2. Фотография устройства для удаления окалины

При выборе угла наклона устройства необходимо руководствоваться следующим: режущая пластина должна гарантированно сдвигать окалину, не царапая обрабатываемую поверхность.

В машинных тисках параллельно плоскости стола станка устанавливался экспериментальный образец. Стол поднимался до касания обрабатываемой поверхности экспериментального образца режущей пластины. Сила прижима режущей пластины к поверхности экспериментального образца определялась с помощью

индикатора часового типа по величине сжатия пружины, которая предварительно тарировалась. Затем инструмент отводился в крайнее положение экспериментального образца и устанавливался по оси его симметрии. Включались вращение шпинделя станка, продольная подача стола и производилась обработка.

Результаты экспериментальных исследований

После обработки результатов многофакторного эксперимента, проведенного по плану $2^{\frac{1}{4-1}}$, была получена регрессионная зависимость, устанавливающая связи момента сопротивления вращению инструмента с основными влияющими факторами. Противодействие работе инструмента (окалиноломателя), заключающееся в сопротивлении моменту его вращения, имеет ряд негативных последствий, таких как повышенный износ режущего инструмента, нагрев технологической системы, снижение качества обработки, уменьшение производительности, увеличенный расход электроэнергии и ряд других. Поэтому выявление значимости влияния каждого из выбранных технологических факторов на величину момента сопротивления вращению инструмента позволит выбрать их рациональные значения и, как следствие, повысить эффективность и качество удаления окалины.

Полученное уравнение регрессии в натуральных значениях переменных имеет вид:

$$M = -0.456 + 0.354 \cdot \alpha - 0.02 \cdot V + + 0.31 \cdot P + 0.0278 \cdot S$$
 (1)

где M — момент сопротивления вращению инструмента, $H \cdot M$; α — угол наклона инструмента, градусов; V — окружная скорость вращения инструмента, м/мин; P — сила воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность, H; S — величина рабочей подачи, мм/об.

Согласно результатам проверки по критерию Фишера, все эти факторы существенно влияют на момент сопротивления вращению M. Коэффициент регрессии при факторе V – отрицательный, это значит, что с увеличением скорости вращения инструмента момент сопротивления уменьшается.

Остальные факторы равенства (1) влияют на его величину в противоположном направлении. Взаимовлияние факторов не выявлено.

Рис. 3-6 иллюстрируют эти выводы. Структура рисунков включает в себя графическое изображение влияния каждого из описанных выше факторов, причем это влияние показано при верхнем, нижнем и промежуточном значениях прочих факторов.

Очевидно, что наиболее значимое влияние на параметр оптимизации оказывает сила воздействия инструмента на поверхность заготовки Р (рис. 3). Причем, это влияние реализуется в прямо пропорциональной зависимости. Если сила возрастает с 40Н до 65Н (в 1,6 раза), момент увеличивается практически в этой же пропорции: с 11 $H \cdot M$ до 18 $H \cdot M$ (в 1,7 раза). Это можно объяснить тем, что увеличение силы P вызывает возрастание силы трения рабочей кромки инструмента об обрабатываемую поверхность. Это обстоятельство непротиворечиво с точки зрения положений теории трибологии, т.к. физические тела произвольной формы взаимодействуют друг с другом по нормали, а нормальная составляющая силы увеличивается пропорционально увеличению модуля вектора силового воздействия. Разумеется, сделанный вывод справедлив в интервалах изменения величин, предусмотренных планом многофакторного эксперимента, с учетом возможности их интерполяции. Необходимо отметить, что план эксперимента был принят, исходя из реальных производственных возможностей индустриального партнера, и соответствовал классическим представлениям теории резания.

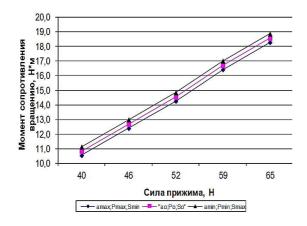


Рис. 3. График влияния на момент сопротивления вращению силы взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью

Окружная скорость инструментальной головки оказывает значимое влияние на момент сопротивления вращению, причем, это влияние обратно пропорционально и специфично, как это следует из рассмотрения рис. 4. Очевидно, что при ее увеличении от 63 м/мин до 157 м/мин (в 2,5 раза) параметр оптимизации уменьшается в 1,14 раза. Характерно, что при

наименьших значениях остальных факторов пропорция более значительна, чем при их наибольших значениях. Объяснить это влияние можно тем, что с увеличением относительной скорости перемещения возрастает сила соударения рабочей кромки инструмента о переднюю кромку окалины, и она более легко разрушается. Кроме того, с возрастанием окружной скорости снижается сила трения инструмента с обрабатываемой поверхностью.

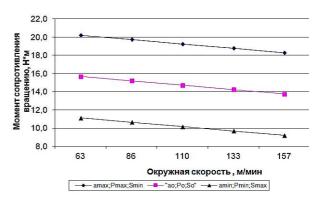


Рис. 4. График влияния окружной скорости вращения инструмента на момент сопротивления

Угол наклона инструментальной головки относительно обрабатываемой поверхности также оказывает большое влияние на параметр оптимизации. Из рассмотрения графика на рис. 5 видно, что с увеличением угла наклона окалиноломателя от 1 до 5 градусов (в 5 раз) параметр оптимизации - момент сопротивления увеличивается в 1,11 раза. Сущность этого явления заключается в том, что увеличение угла наклона вызывает уменьшение тангенциальной составляющей силы взаимодействия рабочей кромки инструментальной пластины с фрагментами окалины, а это, в свою очередь, приводит к снижению момента сопротивления вращению.

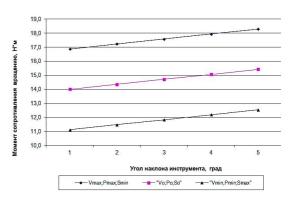


Рис. 5. График зависимости параметра оптимизации от угла наклона инструмента к обрабатываемой поверхности

Математически значимое влияние на момент сопротивления оказывает величина рабочей подачи (рис. 4).

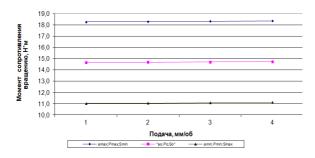


Рис. 6. График влияния рабочей подачи на параметр оптимизации

Однако физически это влияние наименее значимо по сравнению с остальными факторами. По результатам анализа графиков, приведенных на рис. 6, видно, что с возрастанием подачи образцов с 1 до 4 мм/об (в 4 раза) момент сопротивления вращению инструмента увеличивается всего на несколько процентов. Возрастание момента сопротивления вращению при увеличении подачи объясняется тем, что при этом увеличивается длина контакта рабочей кромки инструмента с окалиной, а это, в свою очередь, приводит к возрастанию силы их взаимодействия.

Выполненные исследования позволили определить рациональные режимы технологического процесса очистки проката от окалины. Максимальное допустимое значение S найдем из графиков 3-6. Из этих графиков видно, что при всех допустимых значениях параметров, указанных в выражениях (1), максимальное значение подачи, равное S=4 мм/об, обеспечивается при следующих значениях факторов: $\alpha=5^{\circ}$, V=157 м/мин. и P=65H.

Заключение

Выполнены исследования, которые позволили установить влияние основных технологических факторов на момент сопротивления вращению инструмента при осуществлении технологического процесса очистки поверхности проката от окалины твердосплавной пластиной. Рекомендуемым режимом обработки является следующий: продольная подача инструмента 4 мм/об, угол наклона твердосплавной пластины к нормали обрабатываемой поверхности 5^{0} , скорость вращения инструмента 157 м/мин, сила прижима твердосплавной пластины к обрабатываемой поверхности 65 H.

Результаты исследований предполагается использовать на операции очистки листового проката при изготовлении пустотелых шариков. Но необходимо проводить дальнейшие исследования предложенной технологии, которые позволят существенно расширить область ее практического применения.

Литература

- 1. Теоретическое исследование процесса прохождения горячекатаной полосы через изгибно-растяжной окалиноломатель непрерывно-травильного агрегата / Д.В. Суфьянов, Н.Н. Огарков, Е.А. Мурзаева и др. // Производство проката. 2012. № 10. С. 31-34.
- 2. Исследование возможности наиболее полного удаления окалины с поверхности катанки перед волочением / В.В. Парусов, А.Н. Савьюк, А.Б. Сычков и др.// Металлург. 2004. № 6. С. 69-72.
- 3. Исследование влияния режимов обработки на эффективность очистки листового проката для полых шариков от окалины / А.В. Королев, А.В. Панфилова, О.П. Решетникова и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 3. С. 120-126. DOI 10.25987/VSTU.2020.16.3.016.
- 4. Заявка 2014105408/02 Российская Федерация, МПК В08В 1/04 (2006.01). Способ очистки поверхности / Королев А.В., Королев А.А. (РФ); заявитель Королев А.В., Королев А.А.; заявл. 13.02.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23

Поступила 22.06.2021; принята к публикации 20.08.2021

Информация об авторах

Панфилова Анастасия Вячеславовна — аспирант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: anastasiypanfilova@icloud.com

Королев Альберт Викторович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: science?@bk.ru, тел.+7-905-326-98-92

Решетникова Ольга Павловна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: olgareshetnikova1@yandex.ru, тел.7-961-645-18-44

Изнаиров Борис Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: bageev1@mail.ru, тел.+7-962-622-81-74

Васин Алексей Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. (410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77), e-mail: vasin@sstu.ru, тел. +7-8452-99-87-90

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE EFFICIENCY OF REMOVAL OF SCALE FROM FLATS FOR HOLLOW BALLS

A.V. Panfilova, A.V. Korolev, O.P. Reshetnikova, B.M. Iznairov, A.N. Vasin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Abstract: here we consider the results of experimental studies of the method of removing scale from the surface of steel sheet products. We propose a new method and device for cleaning the surface of rolled sheets from scale by cutting plates rotating around an axis moving translationally along the treated surface. The plates are tilted in the direction of the rotation vector at an angle of up to 10 degrees and are elastically pressed to the treated surface. This makes it possible to reproduce the macrodimensions of sheet metal during the surface cleaning process. We present the results of experimental studies. We constructed mathematical and graphical dependences describing the influence of process factors on the efficiency of cleaning the rolled surface. We show that the most significant influence on the optimization parameter is exerted by the force of the tool's impact on the surface of the workpiece. Moreover, this influence is realized in a directly proportional relationship. Other factors studied, namely the angle of inclination of the plate, its rotation speed and feed, have a much smaller impact on the degree of cleaning of rolled products. These studies were necessary from the point of view of determining the design parameters of the power elements of both the technological equipment implementing this method and the technological installation as a whole. We adopted the experimental plan based on the real production capabilities of the industrial partner and corresponded to the classical concepts of the cutting theory. The described results make it possible to plan further experiments to study the directions of using the method

Key words: hollow balls, experimental studies, scale, processing modes, technological factors, regression dependence, moment of resistance, degree of influence

Acknowledgements: the study was carried out with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation for governmental support of young Russian scientists (PhD) Grant No. MK-2395.2020.8

References

- 1. Suf'yanov D.V., Ogarkov N.N., Murzaeva E.A. et al. "Theoretical study of the process of passing a hot-rolled strip through a bending-stretching scale breaker of a continuously etching unit", *Production of Flates (Proizvodstvo prokata)*, 2012, no. 10, pp. 31-
- 2. Parusov V.V., Sav'yuk A.N., Sychkov A.B. et al. "Investigation of the possibility of the most complete removal of scale from the surface of the wire rod before drawing", *Metallurg*, 2004, no. 6, pp. 69-72.
- 3. Korolev A.V., Panfilova A.V., Reshetnikova O.P. et al. "Research of the influence of processing modes on the efficiency of cleaning sheet metal for hollow balls from scale", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudar-stvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 120-126, DOI 10.25987/VSTU.2020.16.3.016.
- 4. Korolev A.V., Korolev A.A. "Method of surface cleaning" ("Sposob ochistki poverkhnosti"), application 2014105408/02 Russian Federation, IPC B08B 1/04 (2006.01), appl. 13.02.2014; publ. 20.08.2015, bull. 23

Submitted 22.06.2021; revised 20.08.2021

Information about the authors

Anastasia V. Panfilova, graduate student, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskya Street, Saratov 410054, Russia), e-mail: anastasiypanfilova@icloud.com

Al'bert V. Korolev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskya Street, Saratov 410054, Russia), e-mail: science7@bk.ru, tel. +7-905-326-98-92

Ol'ga P. Reshetnikova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskya Street, Saratov 410054, Russia), e-mail: olgareshetnikova1@yandex.ru, tel. 7 +-961-645-18-44

Boris M. Iznairov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskya Street, Saratov 410054, Russia), e-mail: bageev1@mail.ru, tel. +7-962-622-81-74

Aleksey N. Vasin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (77 Polytechnicheskya Street, Saratov 410054, Russia), e-mail: vasin@sstu.ru, tel. +7-8452-99-87-90

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.021 УДК 621.86

РАСЧЕТ НЕСТАНДАРТНОГО ОДНОРОГОГО ГРУЗОВОГО КРЮКА ГРУЗОПОДЪЕМНОГО КРАНА

В.И. Сероштан 1 , П.В. Витчук 1 , В.Ю. Анцев 2 , Н.А. Витчук 3

¹Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Россия
²Тульский государственный университет, г. Тула, Россия
³Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, г. Калуга, Россия

Аннотация: однорогие грузовые крюки грузоподъемных кранов изготавливают способом горячей штамповки и свободной ковки. Действующим стандартом предусмотрено 26 типоразмеров заготовок грузовых крюков. Очевидно, что номенклатура стандартных однорогих грузовых крюков ограничена и не может удовлетворить всего многообразия требований при создании специальных грузоподъемных машин для конкретных условий. В случае применения нестандартных крюков или при нестандартной грузоподъемности крана проводится поверочный расчет крюка. В существующем упрощенном методе расчета однорогих грузовых крюков сечения крюка заменяют правильной трапецией без учета скруглений. Поэтому предложен уточненный метод расчета нестандартных однорогих крюков грузоподъемных кранов. Осуществлена проверка предлагаемого метода при помощи SolidWorks, доказана его точность. Проведен сравнительный анализ результатов вычислений по предлагаемому и существующему упрощенному методам. Сравнение расчетных площадей сечений грузовых крюков, полученных предлагаемым и упрощенным методами, показывает, что разница между ними для стандартных крюков колеблется в пределах 6-10%. В среднем площадь сечения крюка, полученная по предлагаемому уточненному расчету, меньше, чем по упрощенному на 8%. Результаты расчета точной площади поперечного сечения грузового крюка и полученные на их основе значения напряжений в опасных сечениях позволяют на стадии проектирования достичь оптимальной формы грузового крюка. Это позволит в процессе производства получить наименьшее значение металлоемкости грузового крюка, что положительно скажется на его себестоимости

Ключевые слова: грузоподъемный кран, грузовой крюк, заготовка, проектирование, оптимизация

Введение

Однорогие грузовые крюки грузоподъемных кранов изготавливают способом горячей штамповки и свободной ковки [1–3]. Конструкция и размеры заготовок однорогих крюков регламентированы ГОСТ 6627-74* «Крюки однорогие. Заготовки. Типы». Данным стандартом предусмотрено 26 типоразмеров крюков грузоподъемностью от 0,25/0,32 т до 80/100 т в зависимости от типа привода и режима работы.

Очевидно, что номенклатура стандартных однорогих грузовых крюков ограничена и не может удовлетворить всего многообразия требований при создании специальных грузоподъемных машин для конкретных условий. В случае применения нестандартных крюков или при нестандартной грузоподъемности крана проводится поверочный расчет крюка.

Существующий метод расчета однорогих грузовых крюков изложен в [4]. В соответствии с этим методом тело крюка рассчитывают на статическую прочность как кривой брус, рабо-

тающий на растяжение (внутренние волокна) и сжатие (внешние волокна), а также срез. Хвостовую часть крюка рассчитывают как стержень круглого поперечного сечения, работающий на растяжение. Хвостовая часть крюка также имеет резьбу, позволяющую подвешивать его к крановой подвеске. Резьбу рассчитывают по известным зависимостям из курса «Детали машин» [5, 6 и др.].

В расчете нестандартного грузового крюка наибольшую сложность представляет определение размеров сечений его изогнутой части. Эквивалентное напряжение в сечениях изогнутой части крюка составляется в общем случае из напряжений изгиба, растяжения и среза. Для более полного использования механических свойств материала желательно, чтобы максимальные суммарные напряжения внутренних (точки 1 и 3, рис. 1) σ_1 и внешних волокон (точки 2 и 4) σ_2 были равны. Симметричные сечения (прямоугольник, круг и др.) не могут удовлетворить этому условию. У них всегда $\sigma_1 > \sigma_2$. Условие $\sigma_1 = \sigma_2$ соблюдается при несимметричных сечениях в форме трапеции со скругленными углами, утолщенных на стороне,

[©] Сероштан В.И., Витчук П.В., Анцев В.Ю., Витчук Н.А., 2021

обращенной к центру зева крюка. Такая форма поперечного сечения обеспечивает не только лучшее применение материала, но и меньшую трудоемкость изготовления крюка.

В существующем приближенном методе расчета [4] сечение крюка заменяется правильной трапецией без скругленных углов с высотой h большим основанием b и малым основанием b_1 , которые определяются пересечением продолженных боковых сторон действительного сечения с пограничными вертикалями. Это упрощает расчет, но снижает его точность, в результате чего размеры нестандартного крюка получаются неоптимальными.

Известен также метод графоаналитического расчета нестандартного грузового крюка [7]. Данный метод весьма трудоемок и сопровождается рядом неточностей. В [8] изложен метод расчета нестандартного грузового крюка на ЭВМ. Данный метод также весьма трудоемок и подразумевает использование специально разработанного программного обеспечения. В этой связи целесообразной является разработка метода расчета на ЭВМ нестандартного грузового крюка, позволяющего получать точное решение наряду с использованием общедоступных САПР.

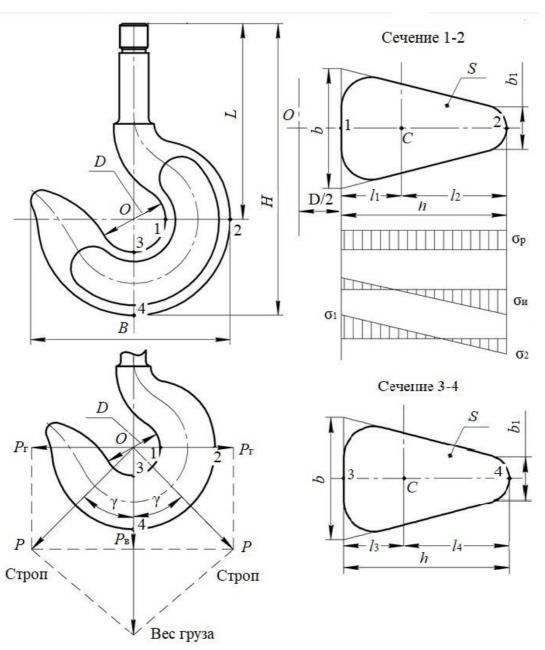


Рис. 1. Расчетная схема однорогого грузового крюка и его сечений: S — площадь поперечного сечения; C — центр тяжести сечения; остальные обозначения см. в тексте

Теоретическая часть

В соответствии с [4], для предварительного определения геометрических размеров сечения нестандартного крюка используют соотношения, которые ориентировочно выдерживаются у всех типоразмеров стандартных крюков:

$$D = 40\sqrt{Q_{\kappa}} \; ; \tag{1}$$

$$h/D \approx 1 \Rightarrow h \approx D$$
; (2)

$$h/b \approx 1.5 \Rightarrow b \approx 0.67h$$
; (3)

$$b/b_1 \approx 2.5 \Rightarrow b_1 \approx 0.4b$$
, (4)

где $Q_{\rm k}$ — грузоподъемность крана; D — диаметр зева крюка.

Проверим данные допущения. Для этого выполним расчет по формулам (1) - (4) загото-

вок стандартных крюков №1...26 по ГОСТ 6627-74*. Результаты даны в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что использование допущений (1) — (4) уже на начальном этапе расчета приводит к возникновению погрешности в пределах -6% до +15% по каждому из параметров. При этом какой-либо однозначной корреляции между геометрическими параметрами крюка и грузоподъемностью крана не наблюдается.

Поэтому для предварительного определения геометрических размеров сечения нестандартного крюка помимо формулы (1) будем использовать соотношения:

$$h \approx 0.95D \; ; \tag{5}$$

$$h/b \approx 1,55 \Rightarrow b \approx 0,65h$$
; (6)

$$b/b_1 \approx 2,25 \Rightarrow b_1 \approx 0,44b$$
. (7)

Таблица 1

Расчет геометрических размеров сечения заготовок крюков по ГОСТ 6627-74*

№ заготовки	<i>D</i> по ГОСТ 6627-74*	$D = 40\sqrt{Q_{\rm K}}$	h/D	h/b	b/b_1
1	20	20,00	0,90	1,50	2,00
2	22	22,63	0,95	1,62	1,63
3	25	25,30	0,96	1,60	1,88
4	30	28,28	0,87	1,44	1,80
5	32	31,75	0,88	1,40	1,82
6	36	35,78	0,89	1,45	2,00
7	40	40,00	0,90	1,50	2,00
8	45	44,72	0,89	1,54	2,17
9	50	50,60	0,90	1,50	2,14
10	55	56,57	0,95	1,53	2,13
11	60	63,25	0,92	1,45	2,11
12	65	71,55	1,00	1,63	2,22
13	75	80,00	1,00	1,56	2,40
14	85	89,44	0,96	1,52	2,25
15	95	100,40	0,95	1,50	2,31
16	110	113,14	0,91	1,54	2,50
17	120	126,49	0,96	1,53	2,68
18	130	141,42	1,00	1,63	2,50
19	150	160,00	1,00	1,67	2,50
20	170	178,89	0,96	1,61	2,55
21	190	200,00	0,97	1,60	2,50
22	210	226,27	0,98	1,58	2,60
23	240	252,98	1,00	1,60	2,50
24	270	282,84	0,96	1,58	2,36
25	300	317,49	0,97	1,53	2,50
26	320	357,77	1,00	1,60	2,50

Также в соответствии с [4] вводят коэффициент кривизны сечения крюка для определения смещения нейтральной оси от линии центра тяжести. При допущении, что центр кривизны нейтральной оси совпадает с геомет-

рическим центром отверстия крюка, этот коэффициент определяют как $k \approx 0,1$. Аналогично предыдущему случаю был проведен расчет коэффициента кривизны сечения крюка для заготовок №1...26 по ГОСТ 6627-74*. Было полу-

чено значение $k \approx 0.93$. Это значение будем использовать в дальнейших расчетах.

Как уже отмечалось, в существующем методе расчета [4] реальное сечение крюка заменяют правильной трапецией без скругленных углов. Рассмотрим реальное сечение крюка (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что реальное поперечное сечение крюка описывается частями линий:

окружностями C_1 , C_2 , C_3 и прямой l_1 в декартовой системе координат ХОУ. Начало координат (точка O) – в геометрическом центре зева крюка. Задача поиска параметров поперечного сечения крюка заключается в том, чтобы через исходные стандартные параметры D, h, b выразить уравнения этих линий и пределы интегрирования их точек сопряжения x_1 , x_2 , x_5 .

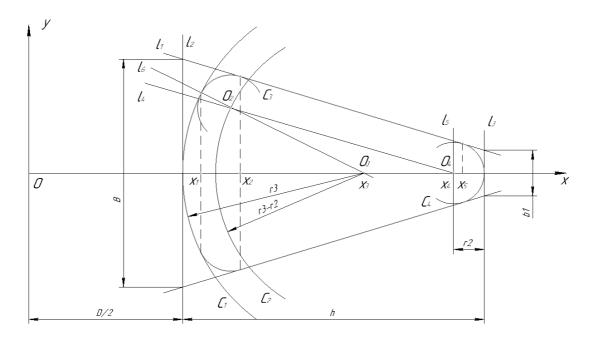


Рис. 2. Геометрия поперечного сечения крюка

Уравнение l_1 задается как прямая, проходящая через точки с координатами $\left(\frac{D}{2}; \frac{b}{2}\right)$ и

$$\left(\frac{D}{2} + h; \frac{b_1}{2}\right)$$
, для нее [8]:
$$\begin{vmatrix} x & y & 1 \\ \frac{D}{2} & \frac{b}{2} & 1 \\ \frac{D}{2} + h & \frac{b_1}{2} & 1 \end{vmatrix} = 0;$$

$$x \begin{vmatrix} \frac{b}{2} & 1 \\ \frac{b_{1}}{2} & 1 \end{vmatrix} - y \begin{vmatrix} \frac{D}{2} & 1 \\ \frac{D}{2} + h & 1 \end{vmatrix} 1 \begin{vmatrix} \frac{D}{2} & \frac{b}{2} \\ \frac{D}{2} + h & \frac{b_{1}}{2} \end{vmatrix} = 0; (8)$$

$$\left(\frac{b}{2} - \frac{b_{1}}{2}\right) x + hy + \left(\frac{Db_{1}}{4} - \frac{Db}{4} - \frac{hb}{2}\right) = 0;$$

$$y = \frac{b_{1} - b}{2} x + \frac{Db}{4h} + \frac{b}{2} - \frac{Db_{1}}{4h}.$$

В свою очередь, параметр b_1 может быть найден (рис. 3):

$$b_{1} = b - 2h \cdot \operatorname{ctg} \left\{ \operatorname{arctg} \left[\frac{2(h - r_{4})}{b} \right] + \operatorname{arcsin} \left[\frac{r_{4}}{\sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^{2} + (h - r_{4})^{2}}} \right] \right\}.$$
 (9)

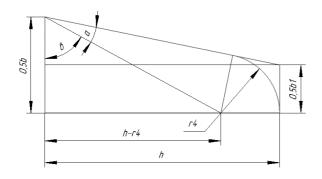


Рис. 3. Схема нахождения параметра b_1

Уравнение прямой l_2 :

$$x = \frac{D}{2} \,. \tag{10}$$

Уравнение прямой l_3

$$x = \frac{D}{2} + h \ . \tag{11}$$

Уравнение прямой l_4

$$y = \frac{b_1 - b}{2h}x + \frac{Db}{4h} + \frac{b}{2} - \frac{Dl_1}{4h} - r_2.$$
 (12)

Уравнение прямой l_5 :

Таким образом, площадь сечения крюка будет равна:

$$S = 2 \left[\int_{D/2}^{x_1} y_{C1}(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} y_{C3}(x) dx + \int_{x_2}^{x_5} y_{I1}(x) dx + \int_{x_5}^{D/2+h} y_{C4}(x) dx \right],$$
 (18)

где x_1, x_2, x_5 – пределы интегрирования.

Тогда для сечения 1–2 (рис. 1)

 наибольшее напряжение растяжения внутренних волокон:

$$\sigma_1 = \frac{P}{S} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{2l_1}{D} \le [\sigma], \tag{19}$$

наибольшее напряжение сжатия внешних волокон:

$$\sigma_2 = \frac{P}{S} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{l_2}{(D/2) + h} \le [\sigma], \quad (20)$$

а для сечения 3-4

 приведенные напряжения при подвеске на двух стропах:

$$\sigma_3' = \sqrt{\sigma_3^2 + 4\tau_{cp}^2} \le [\sigma], \qquad (21)$$

$$\sigma_4' = \sqrt{\sigma_4^2 + 4\tau_{\rm cp}^2} \le \left[\sigma\right],\tag{22}$$

$$x = \frac{D}{2} + h - r_2. {13}$$

Уравнение окружности C_1 :

$$y = \sqrt{r_3^2 - \left(x - \frac{D}{2} - r_3\right)^2} \ . \tag{14}$$

Уравнение окружности C_2 :

$$y = \sqrt{(r_3 - r_2)^2 - \left(x - \frac{D}{2} - r_3\right)^2}$$
. (15)

Уравнение окружности C_3 :

$$y = \sqrt{r_2^2 - (x - x_{O_2})^2} + y_{O_2},$$
 (16)

где x_{O_2} и y_{O_2} – координаты точки O_2 .

Аналогично (16) уравнение окружности C_3 :

$$y = \sqrt{r_2^2 - (x - x_{O_4})^2} + y_{O_4},$$
 (17)

где x_{O_4} и y_{O_4} – координаты точки O_4 .

где $P = Q_K g$ – вес груза; $\sigma_3 = \frac{\text{Ptg}\gamma}{2Sk} \cdot \frac{l_3}{D/2}$, $\sigma_4 = \frac{\text{Ptg}\gamma}{2Sk} \cdot \frac{l_4}{(D/2) + h}$ -

наибольшие напряжения растяжения внутренних и внешних волокон в сечении 3–4; γ – угол между стропами (максимальные приведенные напряжения при γ = 45°); $\tau_{cp} = \frac{P}{2S}$ – напряжения среза в сечении 3–4; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

В соответствии с [4, 8]:

$$\left[\sigma\right] = \frac{\sigma_{\rm T}}{\left[n\right]} \cdot \varepsilon_{\rm M} \,, \tag{23}$$

где $\sigma_{\rm T}$ — предел текучести материала заготовки крюка; [n] — коэффициент запаса; $\varepsilon_{\rm M}$ — масштабный коэффициент, определяется по среднему размеру сечения $b_{\rm cp} = (b+b_1)/2$ (табл. 2).

Коэффициент запаса:

[n] = 1,2 при режимах работы 1M-4M;

[n] = 1,5 при режимах работы 5M-6M.

Таблица 2 Значения масштабного коэффициента

$b_{ m cp}$, mm	ε _м *
20	0,92
30	0,85
40	0,85
50	0,81
75	0,73
100	0,77
150	0,74
200	0,72

Экспериментальная часть

Для проверки предлагаемых зависимостей в среде SolidWorks были созданы модели грузовых крюков для заготовок №1...26 по ГОСТ 6627-74* (рис. 4). Для этих моделей был проведен статический анализ и получены эпюры напряжений от нагрузки, равной номинальной грузоподъемности выбранного крюка. Результаты моделирования совпали с результатами расчетов с погрешностью до 1%.

С целью сравнения предлагаемого метода расчета с упрощенным [4] для заготовок №1...26 по ГОСТ 6627-74* были определены основные параметры поперечных сечений. Результаты даны в табл. 3.

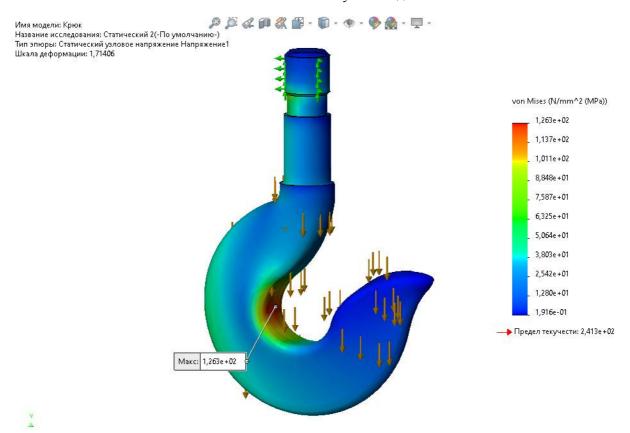


Рис. 4. Нагружение грузового крюка

Таблица 3 Сравнительный анализ предлагаемого и упрощенного методов расчета

№ заготов- ки по	Предлагаемый метод расчета (с учетом скруглений)					Упрощенный метод расчета (без учета скруглений)				
ГОСТ 6627-74*	S, mm ²	σ ₁ , ΜΠα	σ ₂ , МПа	σ ₃ , МПа	$\sigma_4,$ МПа	S, mm ²	σ ₁ , ΜΠα	σ ₂ , МПа	σ_3 , МПа	$σ_4$, ΜΠα
1	146	153	68,6	78,6	38,2	162	138	61,8	70,8	34,4
2	198	147	59,5	75,5	33,7	221	132	53,3	67,6	30,2
3	247	144	60,6	73,9	34,2	276	129	54,2	66,1	30,6

								Прод	олжение	е табл. 3
4	331	139	61,5	70,9	34,1	364	126	55,9	64,5	31,0
5	596	97	42,7	49,4	23,7	434	133	58,7	67,9	32,6
6	491	146	66,0	75,1	36,7	528	136	61,4	69,8	34,1
7	603	148	66,4	76,1	37,0	648	138	61,8	70,8	34,4
8	714	156	71,8	79,8	39,8	760	147	67,5	75,0	37,4
9	922	155	70,3	79,0	39,1	990	144	65,5	73,6	36,4
10	1190	147	65,1	75,7	36,5	1300	135	59,6	69,3	33,4
11	1400	158	71,0	81,1	39,6	1540	144	64,5	73,7	36,0
12	1750	159	68,0	81,2	38,4	1890	147	63,0	75,2	35,6
13	2460	139	61,2	71,4	34,5	2550	134	59,0	68,9	33,3
14	3010	145	63,9	74,1	35,8	3200	136	60,1	69,7	33,7
15	3620	152	68,2	77,7	38,2	3870	142	63,8	72,7	35,7
16	4300	162	76,8	83,2	42,5	4550	153	72,6	78,6	40,2
17	5580	153	71,4	78,6	39,8	5920	144	67,3	74,1	37,5
18	6850	155	69,2	79,8	38,9	7280	146	65,1	75,1	36,6
19	9040	151	67,1	77,5	37,7	9450	144	64,2	74,1	36,1
20	11300	151	69,3	77,6	38,7	11600	147	67,5	75,6	37,7
21	14100	152	69,1	78,1	38,6	14800	145	65,8	74,4	36,8
22	17600	156	71,1	79,9	39,8	18500	148	67,6	76,0	37,9
23	23800	143	63,7	73,5	35,9	25200	135	60,2	69,4	33,9
24	28200	154	68,9	78,8	38,6	30600	142	63,5	72,6	35,6
25	36200	149	68,0	76,8	38,1	38600	140	63,8	72,0	35,7
26	42300	161	71,7	82,7	40,4	44800	152	67,7	78,1	38,1

Сравнение расчетных площадей сечений грузовых крюков показывает, что разница между ними для стандартных крюков колеблется в пределах 6-10%, в среднем площадь сечения крюка по уточненному расчету меньше, чем по упрощенному на 8%. Наибольшие из значений напряжений (в точке 1) при уточненном расчете совпадают со значениями допустимых напряжений.

Выволы

В результате выполнения работы было произведено математическое описание сложной формы опасных сечений грузового крюка, проведен сравнительный анализ результатов вычислений по предложенному и существующему методам.

Результаты расчета точной площади поперечного сечения грузового крюка и полученные на их основе значения напряжений в опасных сечениях позволяют на стадии проектирования достичь оптимальной формы грузового крюка. Это позволит в процессе производства полу-

чить наименьшее значение металлоемкости грузового крюка, что положительно скажется на его себестоимости.

Литература

- 1. Расчеты крановых механизмов и их деталей/ под ред. Р.А. Лалаянца. Изд. 4-е. В 2 т. М.: ВНИИПТМАШ, 1993. Т. 1. 187 с.
- 2. Расчеты крановых механизмов и их деталей/ под ред. Р.А. Лалаянца. Изд. 4-е. В 2 т. М.: ВНИИПТМАШ, 1993. Т. 2. 163 с.
- 3. Справочник по кранам. В 2 т. Т. 1: Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций/под общ. ред. М.М. Гохберга. М.: Машиностроение, 1988. 536 с.
- 4. Павлов Н.Г. Примеры расчета кранов. Л.: Машиностроение, 1976. $320~{\rm c}.$
- 5. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин. М.: Высш. шк., 2008, 408 с.
- 6. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. $564~\rm c.$
- 7. Заводчиков Д.А. Грузоподъемные машины. М.: Машгиз, 1961. 412 с.
- 8. Сероштан В.И., Стрелов В.И. Расчет нестандартного грузового крюка грузоподъемного крана на ЭВМ. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. 19 с.

Поступила 16.03.2021; принята к публикации 19.08.2021

Информация об авторах

Сероштан Владимир Иванович – канд. техн. наук, доцент, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (248000, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, 2), e-mail: swi77@yandex.ru

Витчук Павел Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (248000, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, 2), e-mail: zzzventor@ya.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7916-5056

Анцев Виталий Юрьевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: Anzev@tsu.tula.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5854-5789

Витчук Наталья Андреевна — канд. техн. наук, доцент, Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского (248023, Россия, г. Калуга, ул. Степана Разина, 26), e-mail: vitchuk.natalya@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4250-8956

CALCULATION OF NON-STANDARD SINGLE CARGO HOOK

V.I. Seroshtan¹, P.V. Vitchuk¹, V.Yu. Antsev², N.A. Vitchuk³

¹Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russia ²Tula State University, Tula, Russia ³Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovski, Kaluga, Russia

Abstract: load single-hooks for cranes are made by hot stamping and free forging. The current standard provides for 26 standard sizes of cargo hook blanks. Obviously, the range of standard single-horned cargo hooks is limited and cannot satisfy the whole variety of requirements when creating special lifting machines for specific conditions. In the case of using non-standard hooks or with non-standard crane lifting capacity, a verification calculation of the hook is carried out. In the existing simplified method for calculating one-horned load hooks, the cross-sections of the hook are replaced with a regular trapezoid without taking into account the fillets. Therefore, we propose a refined method for calculating non-standard single-horned hooks of hoisting cranes. We tested the method using SolidWorks and proved its accuracy. We carried out a comparative analysis of the results of calculations by the proposed and existing simplified methods. Comparison of the calculated cross-sectional areas of cargo hooks obtained by the proposed and simplified methods shows that the difference between them for standard hooks ranges from 6-10%. On average, the cross-sectional area of the hook, obtained according to the proposed refined calculation, is less than the simplified one by 8%. The results of calculating the exact cross-sectional area of the load hook and the values of stresses in dangerous sections obtained on their basis allow one at the design stage to achieve the optimal shape of the load hook. This will allow one in the production process to obtain the smallest value of the metal consumption of the cargo hook, which will have a positive effect on its cost

Key words: crane, cargo hook, billet, design, optimization

References

- 1. Lalayants R.A. ed. "Calculations of crane mechanisms and their parts" ("Raschety kranovykh mekhanizmov i ikh detaley"), Moscow, VNIIPTMASH, 1993, vol. 1, 187 p.
- 2. Lalayants R.A. ed. "Calculations of crane mechanisms and their parts" ("Raschety kranovykh mekhanizmov i ikh detaley"), Moscow, VNIIPTMASH, 1993, vol. 2, 163 p.
- 3. Gokhberg M.M. ed. "Crane Reference: Material and load characteristics. Fundamentals of calculation of cranes, their drives and metal structures" ("Spravochnik po kranam: Kharakteristiki materialov i nagruzok. Osnovy rascheta kranov, ikh privodov i metallicheskikh konstruktsiy"), Moscow, Mashinostroenie, 1988, vol. 1, 536 p.
 - 4. Pavlov N.G. "Examples of crane calculation" ("Primery rascheta kranov"), Leningrad, Mashinostroenie, 1976, 320 p.
 - 5. Ivanov M.N., Finogenov V.A. "Details of machines" ("Detali mashin"), Moscow, Vysshaya shkola, 2008, 408 p.
- 6. Dunaev P.F., Lelikov O.P. "Design of assemblies and machine parts" ("Konstruirovanie uzlov i detaley mashin"), Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2017, 564 p.
 - 7. Breeders D.A. "Lifting machines" ("Gruzopod"emnye mashiny"), Moscow, Mashgiz, 1961, 412 p.
- 8. Seroshtan V.I., Shooting V.I. "Calculation of a non-standard cargo hook of a lifting crane on a computer" ("Raschet nestandartnogo gruzovogo kryuka gruzopod"emnogo krana na EVM"), Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 1988, 19 p.

Submitted 16.03.2021; revised 19.08.2021

Information about the authors

Vladimir I. Seroshtan, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch) (2 Bazhenova str., Kaluga 248000, Russia), e-mail: swi77@yandex.ru

Pavel V. Vitchuk, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch) (2 Bazhenova str., Kaluga 248000, Russia), e-mail: zzzventor@ya.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7916-5056

Vitaliy Yu. Antsev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Tula State University (92 Lenina prospekt, Tula 300012, Russia), e-mail: Anzev@tsu.tula.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5854-5789

Natal'ya A. Vitchuk, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky (26 Stepana Razina str., Kaluga 248023, Russia), e-mail: vitchuk.natalya@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4250-8956

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.4.022 УДК 621.98.044.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКЕ

А.Ю. Боташев, Р.А. Байрамуков, Н.У. Бисилов, Р.С. Малсугенов

Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Россия

Аннотация: разработана и представлена схема нового устройства, осуществляющего штамповку деталей с нагревом трубной заготовки воздействием продуктов сгорания газообразной топливной смеси. В качестве топливной смеси может использоваться горючий газ — смесь воздуха с метаном или с пропан-бутаном. Представлены результаты исследования процесса нагрева трубной заготовки воздействием продуктов сгорания. Исследование проведено на базе уравнений конвективного теплообмена, теплового баланса и термодинамики. Получена зависимость для определения температуры нагрева трубной заготовки. Установлено, что температура заготовки зависит от материала и геометрических размеров заготовки, а также давления топливной смеси. Данное устройство обеспечивает нагрев до интервала горячей обработки стальных трубных заготовок диаметром более 150 мм при толщине стенки до 1,2...1,5 мм, а при диаметре более 300 мм — толщиной до 2,0...2,5 мм. Для нагрева трубных заготовок из цветных металлов и сплавов (например, алюминия и меди) требуется меньшее давление топливной смеси, чем для стали, благодаря этому обеспечивается нагрев заготовок значительно большей толщины, в частности, заготовок из алюминия толщиной до 6 мм

Ключевые слова: штамповка деталей из трубной заготовки, нагрев трубной заготовки

Введение

Использование трубной заготовки позволяет значительно снизить себестоимость производства полых тонкостенных деталей. Для производства таких деталей применяются различные методы [1-8]. При этом деформирование трубной заготовки производится в холодном ее состоянии, что ограничивает технологические возможности этих методов. В этой связи нами разработано новое устройство для штамповки полых деталей из трубной заготовки с ее нагревом [9].

Упрощенная схема устройства для штамповки представлена на рис. 1. Данное устройство состоит из цилиндра 1, в котором установлен поршень 2. Поршень 2 вытесняет топливную смесь из полости 3 в полость заготовки 4. Заготовка 5 устанавливается в разрезной матрице 6. Зажигание топливной смеси осуществляется при помощи свечи 7.

Для эффективного осуществления процесса штамповки и достижения максимальной степени раздачи трубной заготовки целесообразно нагреть заготовку до интервала температур горячей обработки. Для оценки возможности достижения интервала температур горячей обработки необходимо проведение исследования процесса нагрева заготовки.

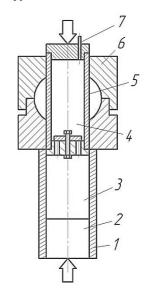


Рис. 1. Схема устройства для штамповки деталей из трубной заготовки

Целью данной работы является исследование процесса нагрева трубной заготовки воздействием продуктов сгорания газообразной топливной смеси. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи: определение максимальной температуры нагрева заготовки и оценка влияния на нее параметров трубной заготовки и энергоносителя.

Определение температуры и давления продуктов сгорания

Вытеснение поршнем топливной смеси из

© Боташев А.Ю., Байрамуков Р.А., Бисилов Н.У., Малсугенов Р.С., 2021

рабочего цилиндра в полость заготовки обеспечивает значительное увеличение давления топливной смеси, при этом повышается и ее температура. Ввиду кратковременности этого процесса можно пренебречь теплообменом топливной смеси с окружающей средой и считать процесс сжатия топливной смеси адиабатическим процессом. Тогда на основании известных соотношений адиабатического процесса [10] можно записать:

$$T_{CK} = T_C (\frac{v_{\text{II}} + v_3}{v_3})^{k_C - 1} = T_C (1 + \vartheta_{\text{II}})^{k_C - 1}, (1)$$

 $\vartheta_{\text{II}} = v_{\text{II}} / v_3,$ (2)

 $\vartheta_{\mathrm{II}} = \mathrm{v}_{\mathrm{II}}/\mathrm{v}_{\mathrm{3}},$ (2) где T_{C} — начальная абсолютная температура топливной смеси, К;

 T_{CK} — абсолютная температура топливной смеси в конце процесса ее сжатия, К;

 V_{II} , V_{3} – объемы рабочего цилиндра и полости заготовки соответственно, м;

 k_c – показатель адиабаты топливной смеси. Начальную температуру топливной смеси можно считать равной температуре окружающей среды. Примем начальную температуру топливной смеси равной стандартной темпера-

туре окружающей среды, т.е.
$$t_C$$
 =15 °C. Тогда T_C = 273+15 = 288 К.

С увеличением соотношения объемов рабочего цилиндра и полости заготовки v_u давление и температура топливной смеси в полости заготовки увеличиваются, однако при этом увеличиваются и размеры штамповочного устройства. Поэтому предельное значение θ_{II} равно 2,5 [12].

При использовании в качестве горючего газа метана или природного газа доля воздуха в топливной смеси составляет около 90%, а при использовании пропан-бутана - не менее 95%. Поэтому показатель адиабаты топливной смеси существенно не отличается от показателя адиабаты воздуха, т.е. k_c=1,4. Тогда, принимая T_C =288 K и v_u =2,5, по зависимости (1) получим T_{CK} =475 К. Таким образом, в конце процесса сжатия абсолютная температура топливной смеси в полости заготовки достигает 475 К, при этом t_{CK} =202 °С.

При сгорании топливной смеси в полости заготовки температура многократно увеличивается. Максимальная температура продуктов сгорания определяется, используя уравнение теплового баланса процесса сгорания газообразного топлива [13]:

22,4 $\xi_z H_u/M_c + C_{vc} t_{CK} = \mu C_{vz} t_z$, (3) где H_u – низкая теплотворная способность горючего газа, $Дж/м^3$;

 M_c – количество топливной смеси, кмоль смеси/кмоль горючего газа;

 C_{vc} – удельная мольная теплоемкость топливной смеси при постоянном объеме, Дж/(кмоль · K);

 t_{CK} — температура топливной смеси перед началом процесса горения, °С;

 t_z – температура продуктов сгорания;

 ξ_z — коэффициент выделения теплоты;

μ - коэффициент молекулярного изменения топливной смеси.

В зависимости от вида горючего газа коэффициент μ находится в пределах 1,03...1,05 [13], примем μ =1,04. Коэффициент выделения теплоты $\xi_z = 0.80...0.83$, примем $\xi_z = 0.8$.

Уравнение (3) решается численным методом. Расчет, проведенный для пропан- бутана, показал, что при $t_{\it CK}$ =203 °C температура продуктов сгорания t_z =2330 °C, при этом абсолютная температура продуктов сгорания T_z =2603 К.

В процессе сгорания топливной смеси заготовка практически не успевает деформироваться, т.е. ее объем остается неизменным, поэтому степень повышения давления в полости заготовки определяется следующей зависимостью

$$\lambda_V = \mu T_Z / T_{CK}. \tag{4}$$

 $\lambda_V = \mu \, T_z / T_{CK}.$ (4) Учитывая, что T_{CK} =475К, по зависимости (4) получим $\lambda_V = 5.7$.

Аналогичный расчет, проведенный для случая использования в качестве горючего газа метана, показал, что $\lambda_V = 5,3$. Исходя из этого, примем осредненное значение $\lambda_V = 5,5$. Основываясь на этом и учитывая зависимости (1) - (4), выразим абсолютную температуру продуктов сгорания через температуру топливной смеси и соотношения объемов рабочего цилиндра и заготовки:

$$T_z = \frac{1}{u} \lambda_V T_C (1 + \theta_{ij})^{k_C - 1}$$
 (5)

Определение температуры нагрева заготовки

Нагрев заготовки происходит как в процессе горения топливной смеси, так и после его завершения. Однако наибольшее увеличение ее температуры происходит после завершения процесса горения, поэтому вначале рассмотрим нагрев заготовки под воздействием продуктов сгорания. Нагрев заготовки происходит преимущественно за счет конвективного теплообмена. Учитывая это, применим уравнение конвективного теплообмена Ньютона-Рихмана [11,13] для определения количества теплоты, передаваемой газом.

$$dQ = \alpha F(t_2 - t_t) d\tau , \qquad (6)$$

 $dQ = lpha F(t_{\scriptscriptstyle \mathcal{C}} - t_t) d au$, где dQ – количество теплоты, Дж;

 α – коэффициенты теплоотдачи, $B_T/(M^2 \cdot K)$;

F – площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки, м²;

 t_{e} – температура газа, °С;

 t_t – температуры тепловоспринимающей поверхностей заготовки, °С;

 τ – время, с.

Нагрев трубкой заготовки осуществляется потоком теплоты к внутренней ее поверхности, поэтому площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки

$$F_3 = \pi d_3 l_3$$

 $F_{\!\scriptscriptstyle 3} = \pi d_{\scriptscriptstyle 3} l_{\scriptscriptstyle 3} \; ,$ где $d_{\scriptscriptstyle 3}$ – внутренний диаметр заготовки, м;

 l_3 – длина деформируемой части заготовки, м.

Общая площадь тепловоспринимающих поверхностей заготовки и тел, закрывающих ее торцы,

$$F = \pi d_3 l_3 + 2 \frac{\pi}{4} d_3^2 \ .$$

Тогда относительная площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки

$$f_3 = F_3/F = 2l_3/(2l_3 + d_3).$$
 (7)

 $f_3 = F_3/F = 2l_3/(2l_3 + d_3).$ (7) Будем считать, что температура всех тепловоспринимающих поверхностей одинакова. Тогда согласно зависимости (6) можно записать

$$O_0 = f_0/O \tag{8}$$

 $Q_{\rm 3} = f_{\rm 3}/Q, \eqno(8)$ где $Q_{\rm 3}$ — количество теплоты, воспринятой заготовкой, Дж;

Q — общее количество теплоты, переданной газом заготовке и другим телам, Дж.

Теплота Q_3 расходуется на увеличение температуры заготовки, следовательно

$$Q_3 = m_3 c_3 (T_3 - T_0), (9)$$

где m_3 – масса заготовки, кг;

 c_3 — удельная теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·К);

 T_{3c} — абсолютная температура заготовки в конце процесса сгорания, К;

 T_3 — конечная абсолютная температура заготовки, К.

Так как
$$m_3 = \pi d_3 l_3 \delta_3 \rho_3$$
, то $Q_3 = \pi d_3 l_3 \delta_3 \rho_3 c_3 (T_3 - T_{3c})$.

Количество теплоты, переданной газом в процессе теплообмена, можно определить следующей зависимостью

$$Q = m_{\Gamma} c_{\Gamma} (T_Z - T_k), \qquad (11)$$

где m_{Γ} – масса газа, кг;

 c_{Γ} – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

 T_k – абсолютная температура газа в конце процесса нагрева заготовки, К.

Масса газа равна массе топливной смеси, находившейся первоначально в рабочем цилиндре и полости заготовки. Ее определим, используя уравнение Клайперона [13]

$$P_c(\mathbf{v}_{\text{II}} + \mathbf{v}_{\text{3}}) = m_{\text{r}} R_c T_c \ . \tag{12}$$

 $P_c(\mathbf{v}_{\text{ц}} + \mathbf{v}_{\text{3}}) = m_{\text{r}} R_c T_c$. (12) Принимая во внимание зависимость (2) и учитывая, что ${
m v_3}=0$,25 $\pi d_3^2 l_3$, можно записать:

$$v_{II} + v_3 = 0.25\pi d_3^2 l_3 (1 + \theta_{II}).$$
 (13)

Из зависимостей (12) и (13) получим

$$m_{\Gamma} = 0.25\pi d_3^2 l_3 P_c (1 + \vartheta_{II}) / (R_c T_c)$$
. (14)

Подставляя это в зависимость (11), будем иметь:

$$Q=0.25\pi d_3^2\,l_3P_cc_{\scriptscriptstyle \Gamma}(1+\vartheta_{\scriptscriptstyle \parallel})\frac{T_z(1-T_k/T_z)}{R_cT_c}\,.\,(15)$$
 С учетом зависимостей (10) и (15) уравне-

ние (8) примет следующий вид

$$\begin{split} \delta_{3}\rho_{3}c_{3}(T_{3}-T_{3c}) &= \\ &= 0.25f_{3}d_{3}c_{r}P_{c}\frac{T_{z}(1+\vartheta_{\parallel})}{R_{c}T_{c}}(1-\frac{T_{k}}{T_{z}}). \end{split}$$

Из этого уравнения определим температуру заготовки

$$T_3 = T_{\rm 3C} + \frac{f_3 d_3 c_{\scriptscriptstyle \Gamma} P_C}{4 \delta_3 \rho_3 c_3} \, \frac{T_Z (1 + \vartheta_{\scriptscriptstyle
m II})}{R_C T_C} \, (1 - \frac{T_k}{T_Z}). \, (16)$$
 Учитывая зависимости (5) и (7), зависи-

мость (16) можно также представить в следующем виде

$$T_{3} = T_{3c} + \frac{l_{3}d_{3}c_{r}}{2\delta_{3}\rho_{3}c_{3}(2l_{3}+d_{3})} \frac{\lambda_{V}P_{c}}{\mu R_{c}} \left(1 + \vartheta_{II}\right)^{k} \left(1 - \frac{T_{k}}{T_{z}}\right). \tag{17}$$

Заменяя абсолютные температуры заготовки на ее температуры по шкале Цельсия,

$$t_{3} = t_{3c} + \frac{l_{3}d_{3}c_{r}}{2\delta_{3}\rho_{3}c_{3}(2l_{3} + d_{3})} \frac{\lambda_{V}P_{c}}{\mu R_{c}} (1 + \vartheta_{II})^{k_{c}} (1 - \frac{T_{k}}{T_{-}}), \tag{18}$$

где t_3 - конечная температура заготовки, °C;

 $t_{\rm 3C}$ – температура заготовки в конце процесса сгорания топливной смеси, °С.

Определяем теперь температуру нагрева заготовки в процессе горения топливной смеси, т.е. величину t_{30} , входящую в зависимость (18). В уравнении теплового баланса процесса сгорания топливной смеси (3) коэффициент ξ_z характеризует долю энергии топливной смеси, идущую на нагрев продуктов сгорания. Оставшаяся часть ее энергии, т.е. потеря энергии, связана с недороганием топливной смеси и теплоотдачей в окружающую среду.

Исходя из этого, можно записать:

$$1 - \xi_{\mathbf{z}} = \varphi + \mathbf{j} \,, \tag{19}$$

где ф - доля энергии топливной смеси, потерянная из-за ее недогорания;

ј – доля энергии топливной смеси, расходуемая на теплообмен с окружающей средой.

Тогда
$$j = 1 - \xi_z - \varphi$$
.

Потеря энергии, связанная с недогоранием топливной смеси, не превышает 5...6%, т.е. ϕ =0,05...0,06. Тогда, учитывая, что ξ_z ≈0,8, можно заключить, что ј=0,14...0,15, примем i=0,14

Количество энергии топливной смеси, находившейся в рабочем цилиндре и полости заготовки, можно определить следующей зависимостью:

$$Q_c = H_c' (v_{ \mu} + v_{ 3}) rac{P_c}{P_a} = H_c' v_{ 3} (1 + \vartheta_{ \mu}) rac{P_c}{P_a}, \eqno(20)$$
 где H_c' – низшая теплотворная способность 1 M^3 топливной смеси при нормальных условиях $(P = P_a; t = 15 \, ^{\circ} C), \ensuremath{\, Дж/M}^3;$

 P_a – атмосферное давление, P_a =101300 Па. Количество теплоты, расходуемое на теплообмен, равно:

$$Q_{T} = jQ_{C}. \tag{21}$$

 ${
m Q_T} = {
m j} {
m Q_c}.$ (21) Количество энергии теплообмена, идущее на нагрев заготовки,

$$Q_3' = f_3 Q_T = \frac{2l_3}{2l_3 + d_3} j Q_c.$$
 (22)

Эта энергия расходуется на увеличение температуры заготовки, поэтому

$$Q_3' = m_3 c_3 (t_{3c} - t_0), (23)$$

 $Q_3' = m_3 c_3 (t_{3c} - t_0), \eqno(23)$ где t_0 – начальная температура заготовки, равная температуре окружающей среды, °С.

Из уравнений (22) и (23) получим

$$t_{3c} = t_0 + \frac{Q_3'}{m_3 c_3} = t_0 + \frac{2l_3}{2l_3 + d_3} \frac{jQ_c}{m_3 c_3}.$$
 (24)

Учитывая, что $m_3 = \pi d_3 l_3 \delta_3 \rho_3$, из зависимостей (20) и (24) получим

$$t_{3c} = t_0 + \frac{jH'_{cl_3}d_3P_{c}(1+\theta_{II})}{\delta_3\rho_3c_3P_{a}(2l_3+d_3)}.$$
 (25)

Объединяя зависимости (18) и (25), получим выражение для определения конечной температуры заготовки

$$t_{3} = t_{0} + \frac{l_{3}d_{3}P_{c}(1+\theta_{II})}{2\delta_{3}\rho_{3}(2l_{3}+d_{3})} \left(\frac{jH'_{c}}{P_{a}c_{3}} + \frac{c_{r}\lambda_{V}}{c_{3}\mu R_{c}}\right) (1 + \theta_{II})^{k_{c}-1} \left(1 - \frac{T_{k}}{T_{z}}\right).$$
(26)

Оценка влияния на температуру заготовки ее размеров и параметров энергоносителя

Проведем расчет температуры для случая нагрева стальной заготовки диаметром 160 мм и толщиной 1 мм, длина формуемой части заготовки l_3 =0,4 м. Согласно справочным данным $\rho_3 = 7800$ кг/м³; $c_3 = 0.46$ кДж/(кг·К); $c_r = 1$ $k_c=1,4; R_c=298$ $\kappa Дж/(\kappa \Gamma \cdot K);$ $\kappa Дж/(\kappa \Gamma \cdot K)$, H_c =3500 кДж/м³. Начальная температура заготовки принята равной 15 °C, а величины λ_{ν} =5,5, v_u =2,5. При нагреве стальной заготовки T_k/T_z pprox

На рис. 2 представлены графики зависимости температуры стальной заготовки от давления топливной смеси при различных значениях ее диаметра, рассчитанные по зависимости (26). Нижняя граница интервала температур горячей обработки стали составляет 850...900 °C, примем ее равной 900 °C. Эта температура показана на рис. 2 горизонтальной линией.

Из графиков видно, что температура нагрева трубной заготовки зависит не только от давления топливной смеси, но и от ее диаметра. Температура стальной заготовки толщиной 1 мм и диаметром 160 мм достигает интервала температур горячей обработки при давлении топливной смеси 1,43 МПа. При той же толщине заготовки и диаметре 200 мм необходимая величина давления топливной смеси составляет 1,2 МПа, а при диаметре 300 мм давление топливной смеси составляет 0,85 МПа. Таким образом, чем больше диаметр трубной заготовки, тем меньшее давление требуется для ее нагрева. Увеличение давления топливной смеси выше 2 МПа не целесообразно. Поэтому при диаметре заготовки 150...200 мм нагрев ее до интервала температур горячей обработки возможен при толщине заготовки до 1,2...1,5 мм, а при диаметре заготовки 300 мм и выше при толщине до 2, 0...2,5 мм.

Для нагрева трубных заготовок из цветных металлов и их сплавов требуется значительно меньшее давление. Рассмотрим это на примере заготовки из алюминия. Для алюминия ρ_3 =2474 $\kappa \Gamma/M^3$; $c_3 = 0.92 \ \kappa Дж/(\kappa \Gamma \cdot K)$. Температура горячей обработки сплавов алюминия составляет 400...500 °С. При нагреве алюминиевых сплавов величина $T_k/T_z \approx 0.5$ [11]. На рис. 2 горизонтальной штриховой линией отмечена температура, равная 450 °C, а также штриховыми линиями показаны графики зависимости температуры алюминиевой заготовки от давления топливной смеси при различных значениях ее диаметра. Из этих графиков видно, что для нагрева до 450 °C трубной заготовки из алюминия диаметром 160 мм и толщиной 1 мм требуется давление топливной смеси 0,34 МПа, т.е. в 4 раза меньше, чем для стальной заготовки. Поэтому можно нагреть до интервала температур горячей обработки трубные заготовки из алюминия и его сплавов толщиной 4...6 мм в зависимости от их диаметра.

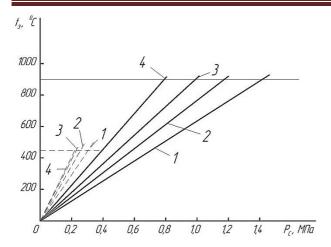


Рис. 2. Зависимость температуры нагрева стальной и алюминиевой (штриховые линии) заготовок от давления топливной смеси при различных диаметрах заготовок: 1-160 мм; 2-200 мм; 3-250 мм; 4-300 мм

Заключение

Получена зависимость для определения температуры нагрева трубной заготовки воздействием продуктов сгорания газообразной топливной смеси. Максимальная температура нагрева заготовки зависит от материала и геометрических размеров заготовки, а также от давления топливной смеси.

При одной и той же толщине трубной заготовки, чем больше ее диаметр, тем меньшее давление требуется для ее нагрева. В частности, для нагрева до 900 °С стальной заготовки диаметром 160 мм требуется давление топливной смеси 1,43 МПа, а при диаметре 300 мм достаточно 0,85 МПа. Для нагрева заготовок из цветных металлов и их сплавов до интервала температур горячей обработки требуется меньшее давление топливной смеси, в частности, для нагрева алюминиевых заготовок требуется давление топливной смеси, по крайней мере, в 4 раза меньше, чем для стальных заготовок.

Данное устройство обеспечивает нагрев до интервала горячей обработки стальных трубных заготовок диаметром более 150 мм при толщине до 1,2...1,5 мм, а при диаметре более

300 мм – толщиной до 2,0...2,5 мм, а заготовок из алюминия и ее сплавов толщиной до 4...6 мм в зависимости от их диаметра.

Литература

- 1. Ильин Л.Н., Семенов Е.И. Технология листовой штамповки. М.: Дрофа, 2009. 479 с.
- 2. Пат. 2209701 Российская Федерация, RU 2209701МПК B21D41/02. Способ раздачи тонкостенных трубчатых заготовок / Ю.Б. Никифоров, Л.А. Костоглот. Опубл. 10.08.2003.
- 3. Пат. 2152285 Российская Федерация, RU 2152285 МПК B21D41/02. Способ получения деталей из трубных заготовок / Б.Н. Марьин, В.Ф. Кузьмин, В.И. Шпорт, Ю.Л. Иванов, В.И. Муравьев. Опубл. 10.07.2000.
- 4. Пат. 2239509 Российская Федерация, RU 2239509 МПК B21D41/02. Способ изготовления полых деталей из трубной заготовки / В.Н. Краев, Е.А. Бабкин, А.Н. Малыгин. Опубл. 10.11.2004.
- 5. Штамповка конических и сферических деталей из трубных заготовок/ Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, Е.И. Третьякова, А.Е. Сосенушкин // Кузнечноштамповочное производство. 2010. № 11. С. 18-21.
- 6. Каменецкий Б.И., Резер А.И., Богатов А.А. Гидравлическая формовка сложных полых изделий// Кузнечно-штамповочное производство. 2006. № 9. С. 26-32.
- 7. Лукьянов В.П., Маткаева И.И., Бойко В.А. Пластическое деформирование при обработке давлением деталей трубопроводов. Волгоград: Панорама, 2012. 168 с.
- 8. Гидромеханическая штамповка деталей трубопроводов/ В.П. Лукьянов, И.И. Маткаева, В.А. Бойко и др. Волгоград: Панорама, 2007. 264 с.
- 9. Пат. 186863 Российская Федерация, RU 186863 МПК В21D 26/08. Устройство для импульсной штамповки деталей из трубчатых заготовок / А.Ю. Боташев, Э.Х. Джуманазаров, Р.А. Байрамуков, Р.С. Малсугенов. Опубл. 06.02.2019. Бюл. № 4.
- 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. Разработка и исследование нового оборудования для штамповки полых изделий из трубной заготовки/ А.Ю. Боташев, Р.А. Байрамуков, Н.У. Бисилов, Э.Х. Джуманазаров, Р.С. Малсугенов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. №4. С.150-156.
- 12. Двигатели внутреннего сгорания/ Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др. М.: Машиностроение, 1983. 273 с.
- 13. Теплотехника: учеб. пособие/ А.В. Гдалев, А.В. Козлов, Ю.И. Сапрунов, С.Г. Майоров. Саратов: Научная книга, 2012. 286 с.

Поступила 01.06.2021; принята к публикации 20.08.2021

Информация об авторах

Боташев Анвар Юсуфович - д-р техн. наук, профессор, Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: botashev11@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/

Байрамуков Рашид Альбертович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и переработка материалов», Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: melov.mel@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7460-6900

Бисилов Назим Урусланович - канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и переработка материалов», Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск, ул. Ставро-польская, 36), e-mail: w9187124909@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9770-0457

Малсугенов Роман Сергеевич - канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и переработка материалов», Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск, ул. Ставро-польская, 36), e-mail: malsugenov roma@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2845-5042

STUDYING THE PROCESS OF HEATING OF A PIPE BILLET DURING GAS FORMING

A.Yu. Botashev, R.A. Bayramukov, N.U. Bisilov, R.S. Malsugenov

North-Caucasian State Academy, Cherkessk, Russia

Abstract: we developed a diagram of a new device for stamping parts by heating a pipe billet by the action of combustion products of a gaseous fuel mixture. A combustible gas can be used as a fuel mixture - a mixture of air with methane or with propane-butane. We present the results of a study of the process of heating a pipe billet by the action of combustion products. We carried out the study on the basis of the equations of convective heat transfer, heat balance and thermodynamics. We obtained the dependence for determining the heating temperature of the pipe billet. We found that the temperature of the workpiece depends on the material and geometric dimensions of the workpiece, as well as the pressure of the fuel mixture. This device provides heating to the hot working interval of steel pipe billets with a diameter of more than 150 mm with a wall thickness of up to 1.2 ... 1.5 mm, and with a diameter of more than 300 mm - with a thickness of up to 2.0 ... 2.5 mm. To heat tubular billets made of non-ferrous metals and alloys (for example, aluminum and copper), a lower pressure of the fuel mixture is required than for steel, due to this, billets of a much greater thickness are heated, in particular, billets made of aluminum with a thickness of up to 6 mm

Key words: stamping of parts from a pipe billet, fuel mixture gas stamping

References

- 1. Il'in L.N., Semenov E.I. "Stamping technology" ("Tekhnologiya listovoy shtampovki"), Moscow, Drofa, 2009, 479 p.
- 2. Nikiforov Yu.B., Kostoglot L.A. "The method of distribution of thin-walled tubular blanks, patent for the invention" ("Sposob razdachi tonkostennykh trubchatykh zagotovok"), patent 2209701 Russian Federation, RU 2209701 IPC B21D41 / 02, publ. 08/10/2003.
- 3. Mar'in B.N., Kuz'min V.F., Shport V.I., Ivanov Yu.L., Murav'ev V.I. "A method of obtaining parts from pipe billets" ("Sposob polucheniya detaley iz trubnykh zagotovok"), patent 2152285 Russian Federation, RU 2152285 IPC B21D41/02, publ. 07.10.2000.
- 4. Kraev V.N., Babkin E.A., Malygin A.N. "A method of manufacturing hollow parts from a tube stock" ("Sposob izgotovleniya polykh detaley iz trubnoy zagotovki"), patent 2239509 Russian Federation, RU 2239509 IPC B21D41/02, publ. 11.10.2004.
- 5. Sosenushkin E.N., Yanovskaya E.A., Tret'yakova E.I., Sosenushkin A.E. "Stamping of conical and spherical parts from pipe billets", *Forging and Stamping (Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo)*, 2010, no. 11, pp. 18-21.
- 6. Kamenetskiy B.I., Rezer A.I., Bogatov A.A. "Hydraulic molding of complex hollow products", *Forging and Stamping (Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo)*, 2006, no. 9, pp. 26-32.
- 7. Luk'yanov V.P., Matkaeva I.I., Boyko V.A. "Plastic deformation during pressure treatment of pipeline parts" ("Plasticheskoe deformirovanie pri obrabotke davleniem detaley truboprovodov"), Volgograd, Panorama, 2012, 168 p.
- 8. Luk'yanov 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.
- 9. Botashev A.Yu., Dzhumanazarov E.Kh., Bayramukov R.A., Malsugenov R.S. "Device for pulse stamping of parts from tubular blanks, patent for utility model" ("Ustroystvo dlya impul'snoy shtampovki detaley iz trubchatykh zagotovok"), patent 186863 Russian Federation, RU 186863 IPC B21D 26/08, publ. 02.06.2019, bull. 4.
- 10. Erofeev V.L., Semenov P.D., Pryakhin A.S. "Heat engineering" ("Teplotekhnika"), textbook, Moscow, Akademkniga, 2008, 488 p.
- 11. Botashev A.Yu., Bayramukov R.A., Bisilov N.U., Dzhumanazarov E.Kh., Malsugenov R.S. "Development and research of new equipment for stamping hollow products from pipe billets", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*), 2020, vol. 16, no. 4, pp.150-156.
- 12. Vyrubov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I. "Internal combustion engines" ("Dvigateli vnutrennego sgoraniya"), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 273 p.
- 13. Gdalev A.V., Kozlov A.V., Saprunov Yu.I., Mayorov S.G. "Heat engineering" ("Teplotekhnika"), Saratov, Nauchnaya kniga, 2012, 286 p.

Submitted 01.06.2021; revised 20.08.2021

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

Rashid A. Bayramukov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropolskaya st., Cherkessk 369001, Karachay-Cherkess Republic, Russia), e-mail: melov.mel@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7460-6900

Nazim U. Bisilov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropolskaya st., Cherkessk 369001, Karachay-Cherkess Republic, Russia), e-mail: w9187124909@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9770-0457

Roman S. Malsugenov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropolskaya st., Cherkessk 369001, Karachay-Cherkess Republic, Russia), e-mail: malsugenov_roma@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2845-5042