

**ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

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

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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**

12+

**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.) – Moscow;
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+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Проблематика управления аддитивным производством на основе технологий промышленного интернета вещей С.Л. Добрынин, В.Л. Бурковский.....	7
Экспертная оценка веб-ориентированных систем на основе лингвистического подхода М.Ю. Сергеев, Т.И. Сергеева, Н.И. Гребенникова.....	14
Поддержка принятия решений в системе распознавания изображений с применением искусственной нейронной сети А.О. Калашников, В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, А.В. Барабанов.....	19
Выбор метода оценивания параметров линейной регрессии на основе выявления аномальных наблюдений С.И. Носков.....	24
Алгоритмизация энергосберегающего управления тиристорными регуляторами мощности автоклавных установок В.Л. Бурковский, Ю.В. Нефедов, Ань Ту Ха, В.Н. Крысанов.....	30
Обзор архитектуры систем управления интеллектом на основе полезности и дерева поведения А.К. Донских, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, М.А. Белых.....	36
Имитационная модель для анализа вероятностно-временных характеристик длительности выполнения комплекса работ С.А. Олейникова, И.А. Селищев.....	42

Радиотехника и связь

Проблемы повышения надежности и качества радиоэлектронных средств и приборов при использовании бессвинцовых припоев Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, О.Ю. Макаров, А.А. Пирогов, А.С. Демихова.....	48
Антенная система с коммутационным сканированием на основе плоской линзы Люнеберга с концентрическими кольцами А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Ф.С. Сафонов.....	54
Устройство управления модулями MPU6050 по шине I ² C на основе микроконтроллера А.Б. Буслаев, Н.Н. Кошелева, С.С. Белокопытов.....	65
Оценка возможностей широкополосных приемников по обнаружению широкополосных сигналов В.А. Махров, А.В. Найденов.....	70
Методика программирования микроконтроллера MDR32F9Q2I в задачах управления и мониторинга М.В. Хорошайлова, А.В. Чернышов, Д.А. Леденев.....	76
Метод повышения точности измерения входных сигналов в микроконтроллерном блоке управления Р.Ю. Кузьменко, И.И. Таболин, А.О. Тищенко, А.Д. Данилов.....	82
Метод уменьшения нелинейности умножающего цифро-аналогового преобразователя с помощью корректирующего преобразователя малой разрядности С.В. Калинин, Ю.С. Балашов, Д.Г. Харин, А.С. Шнайдер.....	87

Обзор способов интеграции антенн и солнечных панелей С.М. Фёдоров, И.А. Черноиваненко, Е.А. Ищенко.....	94
---	-----------

Исследование алгоритмов обнаружения сигналов в когнитивных радиосетях Е.Е. Гринин, А.Б. Антиликаторов, О.В. Четкин, И.А. Новикова.....	101
--	------------

Машиностроение и машиноведение

Исследование роста и растворения оксидной фазы на титане в процессе нагрева при его высокотемпературной обработке И.Л. Батаронов, В.В. Пешков, В.Ф. Селиванов, В.В. Шурупов.....	107
--	------------

Влияние точности инструментальной системы на динамические характеристики многоцелевого станка В.В. Жмурин, А.В. Анцев.....	113
--	------------

Разработка устройства с тепловым энергоприводом для прессования крупногабаритных бетонных изделий А.Ю. Боташев, А.А. Мусаев, М.А. Саидов.....	120
---	------------

Стабилизация качества и производительности шлифования протяженных цилиндрических поверхностей валов лепестковыми кругами С.Г. Бишутин, И.Л. Шупиков.....	127
--	------------

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Problem of additive manufacturing management based on the technologies of the industrial internet of things S.L. Dobrynin, V.L. Burkovskiy	7
Expert evaluation of web-based systems based on the linguistic approach M.Yu. Sergeev, T.I. Sergeeva, N.I. Grebennikova	14
Decision making support in the image recognition system using an artificial neural network A.O. Kalashnikov, V.F. Barabanov, A.M. Nuzhnyy, A.V. Barabanov	19
Choosing a method for estimating the parameters of linear regression based on identification of anomalous observations S. I. Noskov	24
Algorithmization of energy-saving control of thyristor power regulators of autoclave plants V.L. Burkovskiy, Yu.V. Nefedov, An Tu Ha, V.N. Krysanov	30
Intelligence control architecture overview based on utility and behavior tree A.K. Donskikh, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, M.A. Belykh	36
Simulation model for analysing probability-time characteristics of the duration of a set of tasks S.A. Oleynikova, I.A. Selishchev	42

Radio engineering and communication

Problems of improving the reliability and quality of radio electronic products and instruments when using lead-free solders N.V. Astakhov, A.V. Bashkirov, O.Yu. Makarov, A.A. Pirogov, A.S. Demikhova	48
Switching scanning antenna system based on a flat Luneberg lens with concentric rings A.V. Ashikhmin, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendurin, F.S. Safonov	54
MPU6050 module control unit on the I ² C bus based on a microcontroller A.B. Buslaev, N.N. Kosheleva, S.S. Belokopytov	65
Estimation of the capabilities of broadband receivers for detecting broadband signals V.A. Makhrov, A.V. Naydenov	70
Programming method of the MDR32F9Q2I microcontroller in control and monitoring tasks M.V. Khoroshaylova, A.V. Chernyshov, D.A. Ledenyev	76
Method for improving the accuracy of measuring input signals in a microcontroller control unit R.Yu. Kuz'menko, I.I. Tabolin, A.O. Tishchenko, A.D. Danilov	82
Method for nonlinearity minimization of multiplying digital-to-analog converter by low resolution calibration converter S.V. Kalinichenko, Yu.S. Balashov, D.G. Kharin, A.S. Shnaider	87
Overview of methods to integrate antennas and solar cells S.M. Fyedorov, I.A. Chernoiivanenko, E.A. Ishchenko	94
Research of signal detection algorithms in cognitive radio networks E.E. Grinin, A.B. Antilikatorov, O.V. Chetkin, I.A. Novikova	101

Mechanical engineering and science of machines

Investigation of the growth and dissolution of the oxide phase on titanium when heating during its high-temperature treatment I.L. Bataronov, V.V. Peshkov, V.F. Selivanov, V.V. Shurupov.....	107
Influence of tooling system accuracy on dynamic characteristics of multi-purpose machine V.V. Zhmurin, A.V. Antsev.....	113
Development of a heat-driven device for molding large-sized concrete products A.Yu. Botashev, A.A. Musaev, M.A. Saidov.....	120
Stabilization of quality and productivity of grinding of extended cylindrical surfaces of shafts with petal circles S.G. Bishutin, I.L. Shupikov.....	127

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.2.001

УДК 004.75, 65.011.56

ПРОБЛЕМАТИКА УПРАВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

С.Л. Добрынин, В.Л. Бурковский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: произведена классификация технологий аддитивного производства по базовому состоянию материала: жидкая основа, твердая основа, порошковая основа. Даны определения распространенных технологий в зависимости от базового состояния материала. Описаны технологические процессы изготовления прототипов и конечных изделий методами аддитивного производства, включающие в себя проектирование 3D-модели, преобразование форматов, нарезку 3D-модели на слои, формирование G-code и непосредственно печать. Рассмотрены технологии четвертой промышленной революции как инструмент повышения эффективности управления технологическими процессами аддитивного производства. Представлена модель модернизации технологического процесса аддитивного производства на основе технологий промышленного интернета вещей, аппаратной реализацией которого является одноплатный компьютер Raspberry Pi, программной реализацией является MTConnect – промышленный стандарт обмена данными станков с числовым программным управлением. Использование Raspberry Pi, подключенных к нему датчиков и программного обеспечения OctoPrint реализует контроль и удаленное управление технологическим оборудованием аддитивного производства (3D-принтером) в режиме реального времени. Представлено техническое устройство основных подсистем облачной платформы аддитивного производства. Архитектура предлагаемой системы состоит из четырех уровней: уровень адаптера доступа, уровень виртуализации ресурсов, уровень управления службами, уровень пользовательского инструментария

Ключевые слова: аддитивное производство, четвертая промышленная революция, промышленный интернет вещей, распределенная система управления

Введение

Аддитивное производство (АП) – это процесс создания объектов на основе данных трехмерной модели, как правило, слой за слоем (готовое изделие формируется путем сложения материала), в отличие от субтрактивного производства, где применяются методы механической обработки, такие как обработка резаньем (готовое изделие формируется путем вычитания материала). Благодаря послойному изготовлению АП позволяет создавать объекты сложной геометрической формы с минимальным расходом материала, такого как пластмассы, полимеры и металлы. Несмотря на то, что все еще есть некоторые сомнения относительно применимости АП в массовом производстве, использование в промышленности растет благодаря новым технологическим достижениям [1]. Первые применения АП были в области быстрого создания прототипов и макетов. В настоящее время благодаря развитию и повышению качества продукции, изготовление функциональных продуктов конечного использования стало основным технологическим

направлением АП. Такие отрасли, как аэрокосмическая, автомобильная промышленность, в которых потребность в производстве компонентов сложной геометрической формы с минимальным расходом дорогостоящего материала очень высока, используют АП [2]. В медицинском секторе АП применяется в ортодонтии, протезировании, создании имплантов благодаря высокой степени персонализации изготавливаемых изделий [2]. Также технологии АП применяются в области микроэлектроники и радиочастот для разработки следующего поколения устройств микроволнового и миллиметрового диапазона, предназначенных для различных носимых датчиков и RFID-меток [3]. Являясь развивающейся технологией для создания точных и геометрически сложных объектов, АП может предложить способ замены традиционных производственных технологий в ближайшем будущем.

Технологии аддитивного производства

Все оборудование для АП, производимое сегодня, основано на концепции послойного нанесения, а обрабатываемый материал – это

то, что отличает эти устройства. Существует множество отдельных технологий 3D-печати, которые различаются по способу изготовления слоев [4]. Технологические процессы будут отличаться в зависимости от используемого материала и принципа работы машины. Классификация технологий АП разделяется по базовому состоянию материала: жидкая основа, твердая основа, порошковая основа (рис. 1).

Моделирование методом наплавления (FDM, FFF) – формирование объекта основано на послойном осаждении нити из плавкого материала (воск, пластик, металл). Рабочий материал подается в экструдер, который выдавливает через сопло тонкую нить расплавленного материала на охлажденную или нагретую платформу, формируя топологию слоя разрабатываемого объекта [5].

Лазерная стереолитография (SLA) – формирование объекта основано на использовании специального жидкого фотополимера, который затвердевает под действием лазерного излучения. После формирования топологии текущего слоя лазерным излучением объект погружается в фотополимерный состав на толщину одного слоя, далее процесс повторяется. Существует вариация данной технологии – SLA-DLP, в которой вместо лазера используется DLP-проектор. Данная технология позволяет формировать топологию слоя целиком, что ускоряет процесс печати объекта [5].

Изготовление объектов с использованием ламинирования (LOM) – формирование объекта

происходит методом послойного склеивания (давлением, нагревом) тонких пленок рабочего материала с вырезанием топологии контуров на каждом слое с помощью режущего инструмента или лазерного излучения [5].

Лазерное плавление (SLM) – технология послойного АП с использованием лазера. Широкое распространение данной технологии обусловлено высоким качеством изготовления объекта, которое может быть гарантировано малым радиусом лазерного пятна [5].

Селективное лазерное спекание (SLS) – формирование объекта основано на плавлении под действием лазерного излучения из плавкого порошкового материала (пластик, металл). Рабочий материал наносится на платформу равномерным тонким слоем, после чего лазерное излучение формирует топологию текущего слоя разрабатываемого объекта. Далее платформа опускается вниз на толщину одного слоя, и процесс начинается сначала [5].

Электронно-лучевая плавка (EBM) – данная технология похожа на SLS, только здесь формирование объекта происходит путем плавления рабочего материала электронным лучом в вакууме [5].

3D-печать (3DP) – в отличие от SLS, данная технология не использует плавление: формирование объекта из порошкового материала происходит путем склеивания, с использованием струйной печати для нанесения жидкого клея [5].

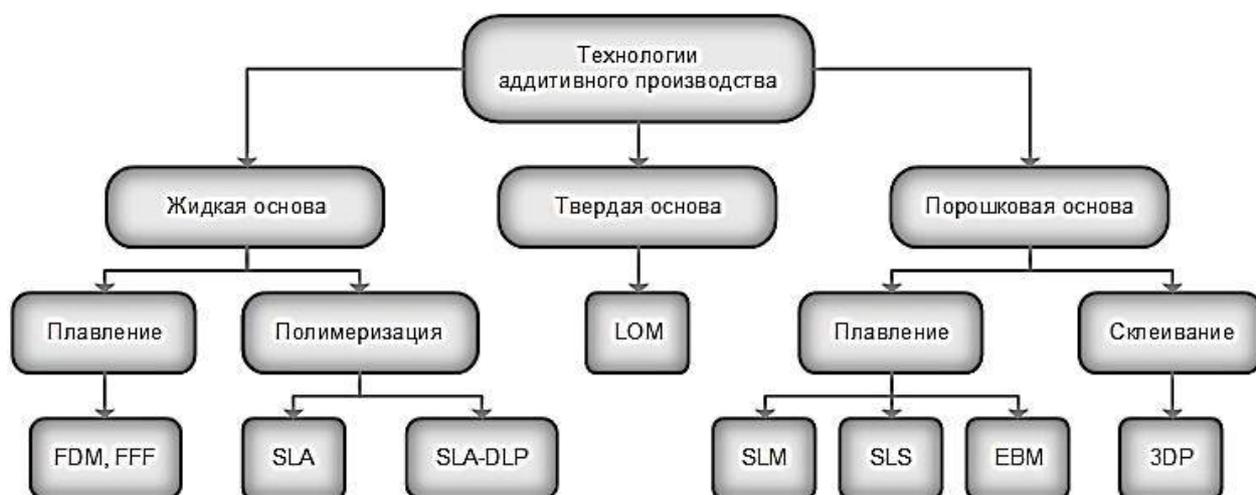


Рис. 1. Классификация технологий аддитивного производства

Технологические процессы аддитивного производства

При изготовлении прототипов и конечных

изделий методами АП каждая технология использует одни и те же технические принципы: компьютер анализирует твердое тело, смоделированное в виртуальной среде (САПР), затем

происходит нарезка 3D модели на слои, которые систематически воссоздаются и объединяются в трехмерный объект на оборудовании – 3D-принтере. Технологические процессы создания объекта показаны на рис. 2.

Процесс обычно начинается с двухмерного изображения (чертежа) или физического трехмерного объекта, такого как прототип или деталь для обратного проектирования. Они преобразуются в цифровые 3D-модели с использованием программного обеспечения для твердотельного моделирования, такие как КОМПАС-3D или SOLIDWORKS. После разработки 3D-модели для дальнейших технологических процессов ее необходимо преобразовать в другой формат данных, который выбирается в зависимости от используемой технологии.



Рис. 2. Технологические процессы создания объекта

Например, если 3D-принтер печатает объекты методом FDM или FFF, файл 3D-модели необходимо преобразовать в формат STL (от англ. stereolithography). Затем модель нарезается или иным образом дискретизируется для создания инструкций для машины с помощью специального программного обеспечения (Cura, Simplify3D и т.д.) и преобразуется в G-code. Также на этом этапе происходит настройка параметров принтера, таких как температура рабочих зон, скорость печати периметров и за-

полнения, толщина слоя, генерация поддерживающих структур. Далее происходит процесс печати, после которого возможна различная постобработка, характерная для выбранной технологии АП.

Аддитивное производство в контексте четвертой промышленной революции

Четвертая промышленная революция (Индустрия 4.0) – парадигма дальнейшего развития автоматизации традиционного производства с использованием современных интеллектуальных технологий для достижения более эффективного и максимально автономного цифрового управления в режиме реального времени [6]. В настоящее время использование современных производственных решений в контексте интеграции информационных технологий играет важную роль в экономической конкурентоспособности. Индустрия 4.0 предлагает кибернетические и физические системы для увеличения эффективности производства с целью создания умных фабрик путем пересмотра роли людей. Ее фундаментальные концепции, связанные с виртуальной средой, включают киберфизические системы, интернет вещей, большие данные, облачные вычисления и т.д., тогда как физическая область включает автономных роботов и АП [7]. Киберфизическая система – новое поколение цифровых систем, которое в основном фокусируется на сложных взаимозависимостях и интеграции между киберпространством и физическим миром. Киберфизическая система состоит из глубоко интегрированных вычислительных, коммуникационных, управляющих и физических элементов. Интернет вещей описывается как концепция сбора информации с физических объектов с использованием компьютерных сетей или современных беспроводных соединений [8]. Информация, извлеченная из продуктов, машин или производственных линий, составляет значительный объем статистических данных, подлежащих обмену и анализу. Другими источниками данных являются проектные записи, заказы клиентов, информация о запасах и логистике. В целом этот большой объем данных определяется как большие данные, что является еще одним важным понятием в Индустрии 4.0. Облачные вычисления, которые связаны с обработкой всей доступной информации, также можно рассматривать как один из значимых терминов в виртуальной производственной среде. Все эти кибер-технологии помогают обеспечить эффек-

тивное использование существующей информации для интеллектуального производства. С другой стороны, физическая часть умных фабрик ограничена возможностями существующих производственных систем. Это делает АП одним из жизненно важных компонентов Индустрии 4.0. Из-за необходимости массовой индивидуализации необходимо разработать нетрадиционные методы производства.

Текущие методы управления АП, в частности, процессами FDM, FFF печати, не реализуют должного качества управления в контексте Индустрии 4.0. Выделяют следующие типы проблем:

- интеллектуальность системы управления. Основанная (в большинстве случаев) на микроконтроллере, система управления не позволяет осуществить интеграцию 3D-принтера в сеть интернет (из-за ограниченных вычислительных ресурсов) [9];

- отсутствие обратной связи, контроля качества. Процесс FDM, FFF печати не предполагает реализации системы, способной детектировать отклонения изготавливаемого изделия от его CAD-модели или возможных нарушений в работе 3D-принтера, таких как эффект «спагетти» и прочих деформаций объекта [9];

- отсутствие системы принятия решений. Как и любой производственный процесс, процессы 3D-печати имеют ряд ограничений, понимание которых необходимо для гарантии совместимости выбранной комбинации параметров с 3D-принтером, материалом, процессом. Раннее рассмотрение этих технологических ограничений на этапе проектирования важно для ускорения разработки изделия и снижения затрат [10];

- планирование расписания АП. Существующие подходы к производственному планированию и составлению графиков должны быть доработаны и адаптированы, чтобы соответствовать техническим требованиям технологий АП [11].

В данной статье рассматривается проблема интеграции 3D-принтера в сеть интернет. Предлагается использование технологий промышленного интернета вещей как инструмента повышения эффективности управления и контроля над технологическими процессами АП, которые интегрируют управление удаленно подключенными 3D-принтерами в расширенную среду PDM в качестве MES функций [12]. Промышленный интернет вещей реализует набор информационных и коммуникационных технологий, которые соединяют рассредото-

ченные датчики или исполнительные механизмы через интернет. Это позволяет собирать информацию с датчиков и активно управлять подключенными машинами или объектами с помощью встроенных исполнительных механизмов. Для FDM, FFF 3D-принтера данные технологии реализуются с помощью одноплатного компьютера Raspberry Pi и программного обеспечения OctoPrint, которое позволяет осуществить контроль и удаленное управление подключенными к интернету 3D-принтерами. Оно поддерживает открытое аппаратное и программное обеспечение для 3D-принтеров. Использование промышленного стандарта MTConnect позволяет интегрировать гетерогенное технологическое оборудование в единую систему управления. С помощью представленной модернизированной системы управления 3D-принтером пользователи могут загружать файлы 3D-моделей, запускать процесс печати своих продуктов, а также контролировать и управлять 3D-принтером в режиме реального времени через интернет. Модель технологического процесса АП на основе технологий промышленного интернета вещей представлена на рис. 3.



Рис. 3. Модель технологического процесса АП на основе технологий IoT

Распределенное аддитивное производство

Интеграция 3D-печати в облачное производство может способствовать развитию буду-

щих интеллектуальных АП и позволить реализовать новый сервис-ориентированный подход к 3D-печати для достижения массовой индивидуализации. Архитектура облачной платформы АП представлена на рис. 4. Эта архитектура предназначена для управления и контроля над облачной моделью АП. Четыре уровня: уровень адаптера доступа, уровень виртуализации ресурсов, уровень управления службами и уровень пользовательского набора инструментов, составляют облачную платформу для АП.

Уровень ресурсов. Как показано на рис. 4, уровень ресурсов находится за пределами облачной платформы, представляя собой территориально-распределенное оборудование – 3D-принтеры. Производители могут предлагать услуги с использованием этих производственных ресурсов на основе модели издатель-подписчик в сервис-ориентированной среде. Эти производственные услуги можно использовать для удаленной работы в облаке и мониторинга в реальном времени. Механизм связи между уровнем виртуализации и уровнем ресурсов основан на интеграции двух протоколов связи – MTConnect и TCP/IP. MTConnect используется в качестве метода связи для сбора данных о ресурсах и их мониторинга. TCP/IP используется как протокол связи для отправки рабочих запросов и получения ответов. Различные типы 3D-принтеров могут быть подключены к интернету в соответствии с различными протоколами связи.

Уровень адаптера доступа. Уровень адаптера доступа отвечает за адаптацию доступа к различным 3D-принтерам, а также за унификацию интерфейсов ввода-вывода. Облачная платформа должна определять набор абстрактных цифровых интерфейсов ввода-вывода 3D-принтеров в качестве стандартных интерфейсов, используемых всеми другими компонентами облачной платформы. Обычно к элементарным интерфейсам относятся получение и установка параметров устройства, мониторинг состояния, управление в реальном времени и контроль доступа.

Уровень виртуализации ресурсов. Информация о подключенных 3D-принтерах и всех видах служб 3D-печати накапливается и находится под централизованным управлением уровня виртуализации ресурсов. Для представления 3D-принтера в виртуальном пространстве необходимо разработать модель цифрового двойника. С одной стороны, должна быть создана структурированная формальная модель для описания машинных параметров 3D-

принтера. С другой стороны, функциональные интерфейсы можно виртуализировать, используя методы виртуализации программного обеспечения. Таким образом, по мере роста количества подключенных к сети 3D-принтеров они могут формировать сеть виртуальных производственных ресурсов на облачной платформе.

Уровень управления службами. На уровне управления службами размещается набор основных облачных сервисов, таких как управление библиотекой 3D-моделей, преобразование формата модели, нарезка моделей на слои, мониторинг и управление виртуальным принтером и технологическим процессом печати. Эти облачные службы разрабатываются как веб-службы RESTful с использованием протокола REST на основе HTTP для межкомпонентной связи. Уровень управления службами также взаимодействует с уровнем пользовательского инструментария, используя протокол REST на основе HTTP.

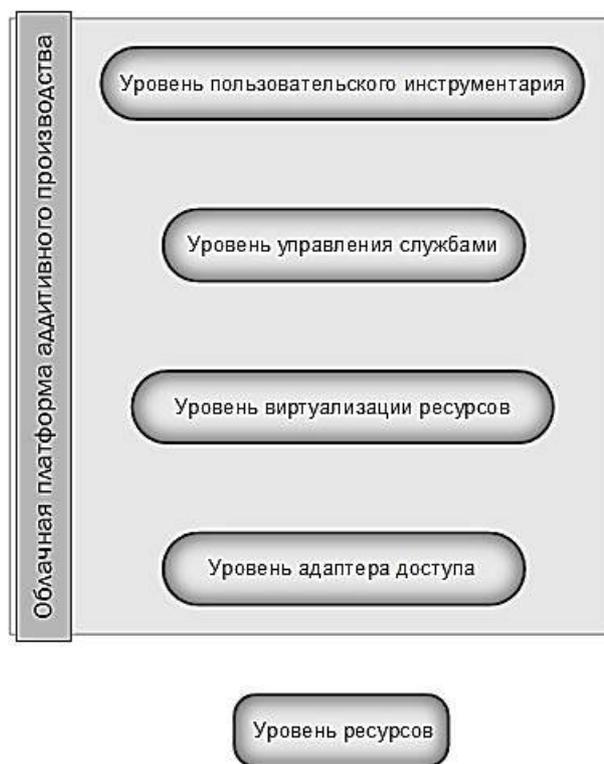


Рис. 4. Архитектура облачной платформы аддитивного производства

Уровень пользовательского инструментария. Уровень пользовательского инструментария предоставляет инструменты для пользователей облачной платформы 3D-печати. Инструментарий в основном состоит из двух категорий инструментов. Одна категория – это инструменты общего назначения, включая управ-

ление пользователями, управление транзакциями, управление бухгалтерским учетом и оценку стоимости производства. Другая категория – соответствующие инструменты для 3D-печати, состоящие из инструмента поиска 3D-модели, инструмента для поиска услуг, онлайн-инструмента САПР, онлайн-инструмента для нарезки моделей и консоли виртуального 3D-принтера.

Заключение

Развитие современных производств предполагает новые способы изготовления прототипов и конечных продуктов. АП является перспективной технологией и позволяет ускорить изготовление продукции и уменьшить расход рабочего материала. Использование технологий четвертой промышленной революции позволяет повысить эффективность управления технологическими процессами АП, благодаря чему становится возможным переход к территориально-распределенному облачному производству.

Литература

1. Краснов А.А., Смоленцев Е.В. Аддитивное и субтрактивное производство // *Инновационная наука*. 2016. №12-2. С. 72 – 75.
2. Additive manufacturing (3D printing) / T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, D. Hui // *A review of materials, methods, applications and challenges*. *Composites Part B: Engineering*. 2018. № 143(1). P. 172-196.
3. Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS)/ S. Kumar, P. Bhushan, M. Pandey & S. Bhattacharya// *Journal of Micromanufacturing*. 2019. № 2(2). P. 175-197
4. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 656 с.
5. Аддитивные технологии [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. Режим доступа: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Аддитивные_технологии (дата обращения: 10.10.2020).
6. The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0/ U.M. Dilberoglu, B. Gharehparagh, U. Yaman, M. Dolen// *Procedia Manufacturing*. 2017. № 11. P. 545-554
7. Vaidya S., Ambad P., Bhosle S. Industry 4.0 – A Glimpse// *Procedia Manufacturing*. 2018. № 20. P. 233–238
8. Wang L. & Wang G. Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0// *International Journal of Engineering and Manufacturing*. 2016. № 4. P. 1-8
9. Kim H., Lin Y. & Tseng T.-L. B. A review on quality control in additive manufacturing// *Rapid Prototyping Journal*. 2018. № 24(3). P. 645–669.
10. Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making / U.K. Zaman, M. Rivette, A. Siadat & S.M. Mousavi// *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018. № 51. P. 169–180.
11. Li Q., Kucukoc I. & Zhang D.Z. Production planning in additive manufacturing and 3D printing // *Computers & Operations Research*. 2017. № 83. P. 157–172.
12. Lee C., Leem C.S. & Hwang I. PDM and ERP integration methodology using digital manufacturing to support global manufacturing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. № 53(1-4). P. 399-409.

Поступила 11.01.2021; принята к публикации 14.04.2021

Информация об авторах

Добрынин Степан Леонидович – аспирант кафедры электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: DobryninSL1994@gmail.com

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

PROBLEM OF ADDITIVE MANUFACTURING MANAGEMENT BASED ON THE TECHNOLOGIES OF THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS

S.L. Dobrynin, V.L. Burkovskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we classified additive manufacturing technologies according to the basic state of the material: liquid base, solid base, powder base. We give definitions of common technologies depending on the basic state of the material. We describe the technological processes of manufacturing prototypes and final products by methods of additive manufacturing, including designing a 3D model, converting formats, slicing a 3D model into layers, forming a G-code and directly printing. We considered the technologies of the fourth industrial revolution as a tool for increasing the efficiency of control of technological processes of additive manufacturing. We present a model of modernization of the technological process of additive manufacturing based on technologies of the industrial internet of things, the hardware implementation of which is a single-board computer Raspberry Pi, the software implementation is MTConnect - an industrial standart for the exchange of data of machine tools with numerical control. Using Raspberry Pi, sensors connected to it and software OctoPrint implements control and remote management of additive manufacturing equipment (3D printer) in real time. We present the technical structure of the main sub-

systems of the cloud platform for additive manufacturing. The architecture of the proposed system consists of four levels: the access adapter level, the resource virtualization level, the service control level, and the user instrumentation level

Key words: additive manufacturing, fourth industrial revolution, industrial internet of things, distributed control system

References

1. Krasnov A.A., Smolentsev E.V. "Additive and subtractive production", *Innovative Science (Innovatsionnaya nauka)*, 2016, no. 12-2, pp. 72-75.
2. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges", *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 143(1) pp.172-196.
3. Kumar S., Bhushan P., Pandey M., Bhattacharya S. "Additive manufacturing as an emerging technology for fabrication of microelectromechanical systems (MEMS)", *Journal of Micromanufacturing*, 2019, 251659841984368.
4. Gibson J., Rosen D, Stacker B. "Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping and digital direct manufacturing" ("Tekhnologii additivnogo proizvodstva. Trekhmernaya pechat', bystroe prototipirovanie i pryamoe tsifrovoe proizvodstvo"), Moscow, TEKHNOSEFERA, 2016, 656 p.
5. "Additive technologies", *Wikipedia*, available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Additive_technologies (date of access 10.10.2020).
6. Dilberoglu U.M., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M. "The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0", *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 11, pp. 545-554.
7. Vaidya S., Ambad P., Bhosle S. "Industry 4.0 – A glimpse", *Procedia Manufacturing*, 2018, vol. 20, pp.233–238.
8. Wang L., Wang G. "Big data in cyber-physical systems, digital manufacturing and Industry 4.0", *International Journal of Engineering and Manufacturing*, 2016, vol. 4, pp.1-8.
9. Kim H., Lin Y., Tseng T.-L.B. "A review on quality control in additive manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, 2018, vol. 24(3), pp. 645–669.
10. Zaman U.K. uz, Rivette M., Siadat A., Mousavi S.M. "Integrated product-process design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, vol. 51, pp. 169–180.
11. Li Q., Kucukkoc I., Zhang D.Z. "Production planning in additive manufacturing and 3D printing", *Computers & Operations Research*, 2017, vol. 83, pp. 157–172.
12. Lee C., Leem C.S., Hwang I. "PDM and ERP integration methodology using digital manufacturing to support global manufacturing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 53(1-4), pp. 399-409.

Submitted 11.01.2021; revised 14.04.2021

Information about the authors

Stepan L. Dobrynin, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: DobryninSL1994@gmail.com

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

ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА ВЕБ-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

М.Ю. Сергеев, Т.И. Сергеева, Н.И. Гребенникова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрен подход к оценке результатов разработки веб-ориентированных систем в рамках экспертных систем на основе применения лингвистического подхода. Рассмотрены особенности формирования интегральных показателей качества функционирования и эксплуатации веб-ориентированных систем. Показан способ формализации требований экспертов к веб-ориентированным системам. Оценка эксплуатационных характеристик строится на основе формирования лингвистических шкал, позволяющих оценить качественные показатели, не имеющие количественной оценки. Приведены примеры лингвистических термов для оценки разнообразных показателей работы веб-ориентированных систем. Приведено соответствие между уточняющими показателями качества разработанной системы и лингвистическими терминами. Рассмотрен подход к переходу от качественных показателей к количественным частотным характеристикам. Экспертная система обеспечивает учет неопределенности в оценке веб-проектов и базируется на формализации неточной и нечеткой информации. Предложенный подход к формированию экспертной системы оценки разработанной веб-ориентированной системы обеспечивает согласованную оценку разработанной системы с помощью группы интегральных показателей качества. Экспертная оценка позволит определить соответствие реализации проекта поставленным целям разработки, что, в свою очередь, даст возможность установить, насколько будет успешной финансовая составляющая деятельности компании, что является главным показателем эффективности

Ключевые слова: веб-ориентированная система, экспертная оценка, лингвистическая модель оценки

Введение

Эффективное функционирование современной компании невозможно без ее представительства в интернете, с помощью которого можно организовать рекламную компанию производимых изделий и услуг, оперативное выполнение заказов и организацию обратной связи с потребителем.

Экспертная оценка созданного интернет-представительства позволит определить соответствие реализации проекта поставленным целям разработки, оценить качественные характеристики использования представительства в интернете.

Экспертная оценка реализуется с помощью системы показателей. Показатели оценки работы веб-ориентированной системы чаще всего являются качественными показателями, не имеющими количественной оценки.

Экспертная оценочная система может быть построена на использовании лингвистической модели оценки [1].

Лингвистическую модель оценки можно применить в следующих случаях:

- показатели оценки работы системы носят качественный характер;
- экспертные оценки целесообразно формировать на естественном языке;

- оценка свойств системы осуществляется с применением человеческих ощущений;
- точные количественные оценки получить невозможно, допустимы приблизительные оценки;
- оценка системы происходит в условиях неопределенности, неточности и нечеткости знаний.

В этих условиях лингвистический подход заключается в применении лингвистических переменных в качестве средства оценки показателей работы системы.

Качественные показатели оценки веб-ориентированной системы

Оценку работы веб-ориентированной системы можно осуществлять с применением количественных показателей и интегральных показателей качества.

Интегральными показателями качества могут быть следующие [2, 3]:

- дизайн;
- степень дружелюбности интерфейса;
- простота навигации по веб-страницам;
- развитые функциональные возможности сервисной поддержки;
- полнота представления информации о товарах и услугах;
- простой инструментарий реализации поиска и заказа товаров и услуг;

- приемлемое время обработки заказов;
- понятные технологии и средства выполнения платежей;
- стоимость обслуживания программного обеспечения.

Каждый из интегральных показателей качества может иметь совокупность уточняющих характеристик.

Например, оценка дизайна веб-приложения реализуется по следующим уточненным характеристикам [4]:

- визуальные аспекты объектов (их размер, форма, цвет);
- пропорции и взаимное расположение объектов;
- текст и фон, текстуры, шрифт, контраст;
- общий дизайн сайта.

Например, интегральный показатель качества «Степень дружелюбности интерфейса веб-приложения» может оцениваться следующими уточняющими показателями:

- развитые и удобные средства для компоновки электронного каталога товаров;
- разнообразные и удобные средства поиска, подбора и фильтрации товаров по различным критериям;
- разнообразные и удобные инструменты работы с «корзиной заказов».

В зависимости от назначения веб-приложения может по-разному оцениваться выполнение основных функций приложения.

Для систем учебного назначения это могут быть следующие функциональные показатели [5]:

- полнота и вариативность учебно-методического обеспечения учебного процесса;
- наличие лекционного материала, глоссария, методических рекомендаций для проведения всех видов занятий;
- адаптивная система тестирования для проверки теоретических знаний, решения стандартных и прикладных задач;
- наличие вопросов к зачету и экзамену;
- наличие списка литературы и источников из интернета.

Для производственных систем оценка функциональности разработанной системы может быть реализована с помощью следующих показателей [6]:

- развитая система поиска информации об услугах и товарах;
- оперативное формирование разрешительной и сопроводительной служебной документации;
- удобная система ввода и редактирования данных в базу данных;

- наличие системы анализа оперативных данных.

Лингвистическая модель оценки

Для оценки разработанной системы по группе интегральных показателей качества в нечеткой информационной среде целесообразно применить лингвистическую модель оценки.

Один из вариантов лингвистической модели оценки базируется на ординальном лингвистическом оценивании. В такой модели оценка представляет собой некоторый лингвистический терм, взятый из лингвистической шкалы

$$T = \{T_1, \dots, T_N\}.$$

Таким образом, для применения данной модели надо сформулировать для каждого интегрального показателя качества лингвистические термы, образующие шкалу T .

Лингвистическая шкала – это конечное упорядоченное множество термов $\{T_k\}$,

$$k = 1, \dots, K [1].$$

При формировании множества термов выполняется правило [1]:

$$\text{если } i < j, \text{ то } T_i \text{ предшествует } T_j (T_i < T_j).$$

Мощность лингвистической шкалы – это количество термов. Мощность соответствует способности эксперта отличать значимые лингвистические значения шкалы. Выбор оценки (терма) определяется компетентностью эксперта в рассматриваемой предметной области.

Как правило, мощность лингвистической шкалы равна 5, 7 или 9. Как правило, лингвистические оценки возрастают от первого к последнему.

Каждый качественный показатель оценки разработанной системы может оцениваться с помощью своей лингвистической шкалы, имеющей разную мощность.

В качестве примера лингвистической шкалы, имеющей пять термов, можно предложить следующие оценки: отлично, хорошо, достаточно хорошо, удовлетворительно и неудовлетворительно.

Для интегрального показателя «Дизайн» интерпретация оценок может быть следующей.

Оценка «Отлично» означает, что все уточняющие характеристики дизайна (размер, форма, цвет, пропорции, расположение, шрифт, фон, текстура и т.д.) имеют высокую степень визуальной реализации.

Оценка «Хорошо» означает, что все уточняющие характеристики дизайна выполнены на хорошем визуальном уровне.

Оценка «Достаточно хорошо» означает, что большинство уточняющих характеристик

дизайна выполнено на хорошем визуальном уровне.

Оценка «Удовлетворительно» означает, что уточняющие характеристики дизайна имеют минимально приемлемый уровень визуальной реализации.

Оценка «Неудовлетворительно» означает, что уточняющие характеристики дизайна имеют неприемлемый уровень визуальной реализации.

Для интегрального показателя «Степень дружелюбности интерфейса веб-приложения» интерпретация термов может быть следующей.

Оценка «Отлично» означает, что все уточняющие характеристики реализованы в полном объеме и на высоком уровне, имеют понятный и удобный интерфейс.

Оценка «Хорошо» означает, что все уточняющие характеристики в целом реализованы в полном объеме и на высоком уровне.

Оценка «Достаточно хорошо» означает, что все уточняющие характеристики в целом реализованы в полном объеме.

Оценка «Удовлетворительно» означает, что все уточняющие характеристики реализованы в соответствии с минимальными требованиями.

Оценку «Неудовлетворительно» выставляют, когда минимальные требования к уточняющим характеристикам не выполнены.

Оценки (термы) должны иметь соответствующие весовые (числовые) характеристики, взятые, например, из диапазона от 1 до 10 баллов. Распределение числовых характеристик для оценок (термов) может быть следующим: отлично - 10, хорошо - 7, достаточно хорошо - 5, удовлетворительно - 3, неудовлетворительно - 0.

Порядок формирования экспертной системы оценки на основе лингвистического подхода

Рассмотрим задачу формирования экспертной системы оценки на основе лингвистической шкалы.

Пусть $E = \{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ – группа экспертов.

Чем больше экспертов, тем точнее будут полученные оценки. Количество экспертов должно быть 10 или больше.

На первом этапе эксперты формируют систему интегральных показателей качества. Для каждого интегрального показателя качества определяется перечень уточняющих характеристик.

На втором этапе для каждого интегрального показателя качества формируется лингвисти-

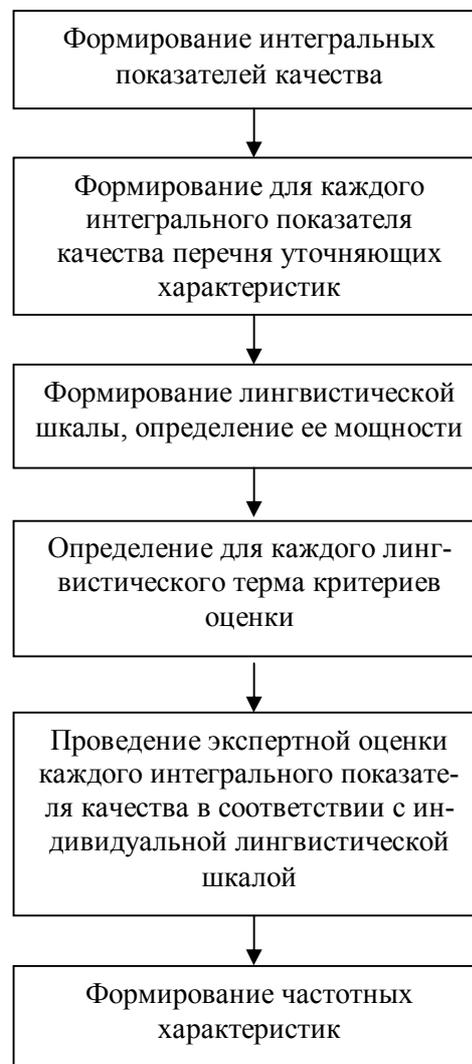
ческая шкала и определяется ее мощность. Для каждого лингвистического терма (оценки) формулируются критерии оценки каждого терма.

На третьем этапе группа экспертов реализует экспертную оценку каждого интегрального показателя качества в соответствии с ее индивидуальной лингвистической шкалой. Для каждого интегрального показателя качества получают вектор оценок.

$$A = \{a_i\}, i = 1, \dots, m.$$

На четвертом этапе для каждого лингвистического терма (оценки) вычисляют частотные характеристики, которые определяют, сколько экспертов выбрали данный терм. Числовые частотные характеристики для наглядности заменяют процентными значениями.

Этапы построения и применения экспертной системы приведены на рисунке.



Этапы реализации лингвистического подхода

На первом этапе эксперты формируют систему интегральных показателей качества. Для каждого интегрального показателя качества определяется перечень уточняющих характеристик.

На втором этапе для каждого интегрального показателя качества формируется лингвистическая шкала и определяется ее мощность. Для каждого лингвистического термина (оценки) формулируются критерии оценки каждого термина.

На третьем этапе группа экспертов реализует экспертную оценку каждого интегрального показателя качества в соответствии с ее индивидуальной лингвистической шкалой. Для каждого интегрального показателя качества получают вектор оценок.

$$A = \{a_i\}, i = 1, \dots, m.$$

На четвертом этапе для каждого лингвистического термина (оценки) вычисляют частотные характеристики, которые определяют, сколько экспертов выбрали данный термин. Числовые частотные характеристики для наглядности заменяют процентными значениями.

Пример экспертной оценки с применением лингвистической шкалы

Разработанную веб-ориентированную систему оценивают с применением интегрального показателя «Дизайн». Результаты оценки 10 экспертов приведены ниже.

Номер эксперта	Оценка	Балл
1	отлично	10
2	хорошо	7
3	достаточно хорошо	5
4	удовлетворительно	3
5	отлично	10
6	отлично	10
7	достаточно хорошо	5
8	хорошо	7
9	хорошо	7
10	хорошо	7

Расчет частотных характеристик приведен ниже.

Оценка	Частотная характеристика
отлично	3
хорошо	4
достаточно хорошо	2
удовлетворительно	1

Для лучшего восприятия числовые

частотные характеристики заменяют процентными значениями.

Оценка	Частотная характеристика в процентах
отлично	30 %
хорошо	40 %
достаточно хорошо	20 %
удовлетворительно	10 %

Таким образом, интегральный показатель «Дизайн» большинством экспертов оценен на оценку «Хорошо» или «Отлично».

Заключение

Предложенный подход к формированию экспертной системы оценки разработанной веб-ориентированной системы обеспечивает согласованную оценку разработанной системы с помощью группы интегральных показателей качества.

Учет мнения экспертов ведется с применением лингвистических оценок (лингвистических терминов), которые затем заменяют на их числовые частотные характеристики.

Экспертная система обеспечивает учет неопределенности в оценке веб-проектов и базируется на формализации неточной и нечеткой информации.

Литература

1. Леденева Т.М., Подвальный С.Л., Васильев В.И. Системы искусственного интеллекта и принятия решений. Уфа: УГАТУ, 2005. 206 с.
2. Сергеев М.Ю., Сергеева Т.И. Моделирование системы оптимального выбора программного обеспечения интернет-представительства организации // Информационные технологии моделирования и управления. 2017. Т. 107. № 5. С. 379-386.
3. Сергеев М.Ю., Сергеева Т.И. Оптимизация выбора программного обеспечения виртуальной торговой площадки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 5. С. 43-45.
4. Кирсанов Д. Веб-дизайн: книга Дмитрия Кирсанова. СПб.: Символ-Плюс, 2004. 376 с.
5. Сергеев М.Ю., Сергеева Т.И. Подход к проектированию и разработке веб-ориентированных систем учебного назначения // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 4 (77). С. 86-90.
6. Application of WEB technologies for workstations organization / N.I. Grebennikova, M.Yu. Sergeev, T.I. Sergeeva, V.Yu. Vorontsov // Modern informatization problems in simulation and social technologies: Proceedings of the XXVI-th International Open Science Conference (Yelm, WA, USA, January 2021); Editor in Chief Dr. Sci., Prof. O.Ja. Kravets. Yelm, WA, USA: Science Book Publishing House, 2021. P. 28-332.

Информация об авторах

Сергеев Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mikesergeev@mail.ru

Сергеева Татьяна Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sergeevati_vgtu@mail.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

**EXPERT EVALUATION OF WEB-BASED SYSTEMS
BASED ON THE LINGUISTIC APPROACH**

M.Yu. Sergeev, T.I. Sergeeva, N.I. Grebennikova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers an approach to evaluating the results of the development of web-oriented systems in the framework of expert systems based on the use of a linguistic approach. It discusses the features of the formation of integral indicators of the quality of functioning and operation of web-oriented systems. We show the method of formalizing the requirements of experts for web-based systems. The evaluation of operational characteristics is based on the formation of linguistic scales that allow one to evaluate qualitative indicators that do not have a quantitative assessment. We give examples of linguistic terms for evaluating various performance indicators of web-oriented systems and also we give the correspondence between the clarifying quality indicators of the developed system and the linguistic terms. We considered an approach to the transition from qualitative indicators to quantitative frequency characteristics. The expert system takes into account the uncertainty in the evaluation of web projects and is based on the formalization of inaccurate and fuzzy information. The proposed approach to the formation of an expert evaluation system of the developed web-based system provides a consistent assessment of the developed system with the help of a group of integral quality indicators. The expert assessment will determine the compliance of the project implementation with the set development goals, which, in turn, will make it possible to determine how successful the financial component of the company's activities will be, which is the main indicator of efficiency

Key words: web-based system, expert evaluation, linguistic evaluation model

References

1. Ledeneva T.M., Podvalnyy S.L., Vasil'ev V.I. "Systems of artificial intelligence and decision-making" ("Sistemy iskusstvennogo intellekta i prinyatiya resheniy"), Ufa, USATU, 2005, 206 p.
2. Sergeev M.Yu., Sergeeva T.I. "Modeling of the optimal choice of software for the Internet representation of an organization", *Information Technologies of Modeling and Management (Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2017, vol. 107, no. 5, p. 379-386
3. Sergeev M.Yu., Sergeeva T.I. "Optimization of the choice of software for a virtual trading platform", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 5, p. 43-45.
4. Kirsanov D. "Web design: the book of Dmitry Kirsanov" ("Veb dizayn: kniga Dmitriya Kirsanova"), St. Petersburg, Symbol-Plyus, 2004, 376 p.
5. Sergeev M.Yu., Sergeeva T.I. "Approach to designing and developing web-oriented educational systems", *Management Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2019, no. 4 (77), pp. 86-90.
6. Grebennikova N.I., Sergeev M.Yu., Sergeeva T.I., Vorontsov V.Yu. "Application of WEB technologies for workstations organization", Proc. of the XXVI-th Int. Open Science Conf.: Modern Informatization Problems in Simulation and Social Technologies (Yelm, WA, USA, January 2021), Science Book Publishing House, 2021, pp. 28-332.

Submitted 01.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Mikhail Yu. Sergeev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mikesergeev@mail.ru

Tat'yana I. Sergeeva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sergeevati_vgtu@mail.ru

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

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

А.О. Калашников, В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, А.В. Барабанов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены вопросы создания системы поддержки принятия решений при составлении паспорта дороги. Одной из задач, решаемых в процессе паспортизации автомобильной дороги, является заполнение данных о наличии и расположении искусственных сооружений, дорожных инженерных устройств, в том числе дорожных знаков. Система предназначена для автоматизированного анализа видеопотока с целью выделения кадров, содержащих дорожные знаки, а также последующей классификации найденных знаков. Приведена оригинальная двухэтапная система извлечения и классификации изображений, содержащих дорожные знаки. Алгоритм обнаружения требуемых изображений базируется на использовании вейвлет-преобразований Хаара и концепции интегрального изображения, что позволяет максимально быстро находить требуемые кадры. Оригинальность применения признаков Хаара состоит в том, чтобы использовать только 2 прямоугольных фильтра (горизонтальный и вертикальный) в разных масштабах: 2x2, 4x4, 8x8 и 16x16. Последующая обработка данных, целью которой является классификация найденных изображений, осуществляется с применением искусственной нейронной сети. Актуальность разработки подобной системы поддержки принятия решения определяется необходимостью обработки больших объемов видеоданных. Система позволяет в значительной мере исключить фактор пользовательских ошибок, что очень важно, так как полученные данные влияют на безопасность дорожного движения

Ключевые слова: распознавание образов, признаки Хаара, нейронные сети, машинное обучение

Введение

В данной статье рассмотрены вопросы разработки системы поддержки принятия решений для распознавания изображений (обнаружение дорожных знаков) с применением искусственной нейронной сети.

Система предназначена для анализа видеопотока с целью получения информации о расположении дорожных знаков, а также выполнения классификации дорожных знаков, найденных на отдельных кадрах.

Задача обнаружения и распознавания дорожных знаков является актуальной при автоматизированном составлении паспорта дороги, разработке интеллектуальных систем, ориентированных на обнаружение потенциально опасных ситуаций с транспортными средствами для раннего предупреждения водителя.

Для решения поставленной задачи в разрабатываемой системе применены два алгоритма:

- алгоритм обработки изображений, направленный на извлечение характеристик дорожных знаков с помощью дескрипторов Хаара;
- алгоритм искусственного интеллекта на базе искусственных нейронных сетей для обнаружения и классификации дорожных знаков.

Чтобы увеличить скорость вычисления извлекаемых признаков по дескриптору, для

представления изображения используется концепция интегрального изображения.

Обучение системы выполняется на наборе положительных изображений (содержащих дорожные знаки) и отрицательных изображений (на которых знаки отсутствуют), а тест проводится на другом наборе сцен (положительных или отрицательных).

Проблема повышения производительности предлагаемой системы решается путем изменения одного из определяющих параметров, который представляет собой количество нейронов в скрытом слое.

Анализ возможностей использования методов распознавания

В литературе описано использование различных типов датчиков для обнаружения дорожных знаков, таких как ультразвуковой датчик, лазерный сканер и камера [1]. Ранее авторами рассмотрены вопросы получения и автоматизации обработки данных электромагнитного сканирования дорожной одежды с последующей визуализацией [2].

Активные датчики могут работать в разных средах, они способны различать всевозможные препятствия (автомобиль, ограждение, лесные насаждения и др.), но для системы распознавания образов достаточных данных они не предоставляют. Наиболее подходящим средством обнаружения дорожных знаков являются камеры, поскольку они наиболее близки к системе визу-

ального восприятия человека и предоставляют обширную информацию для применения методов распознавания и классификации образов.

В настоящее время существует множество алгоритмов обнаружения объекта на изображении. Наиболее простым решением задачи является подробный поиск всех возможных вариантов представления требуемого объекта на обрабатываемом изображении. Однако ресурсоемкость данного способа не позволяет достичь необходимой скорости получения результата. Этот же недостаток характерен и для таких методов, как фильтры Габора, эволюционные алгоритмы, метод главных компонент (РСА) [2,3] и пр.

В настоящее время для решения этой проблемы разработаны надежные и быстрые алгоритмы обнаружения объектов на изображении. Эти алгоритмы работают в два этапа.

Этап обучения заключается в изучении классовых характеристик объектов поиска по набору изображений. Каждое изображение из обучающей выборки представляется вектором признаков, извлеченным с помощью алгоритма обработки изображений.

Этап обнаружения состоит в сегментации исходного изображения на зоны с последующим извлечением вектора признаков каждой зоны с помощью того же алгоритма, который использовался на этапе обучения.

Среди наиболее известных систем обнаружения объектов выделяется система, предложенная Виолой и Джонсом, в которой для поиска нужных объектов используются признаки Хаара, а характерной особенностью является каскадирование набора признаков для быстрого отбрасывания окон, где требуемый объект не найден. Эта особенность метода является крайне актуальной с учетом характера рассматриваемой задачи, где процент наличия позитивных (содержащих требуемые данные) изображений достаточно мал. Каскад Виолы-Джонса стал одним из стандартов для построения эффективных и быстрых классификаторов и до сих пор является основополагающим для поиска объектов на изображении в реальном времени. Этот метод показал себя настолько эффективным в задаче распознавания изображений (ставшей эталонным примером для разработки и тестирования детекторов объектов), что его реализация была включена в открытую библиотеку компьютерного зрения OpenCV.

Система принятия решения для обнаружения дорожных знаков

Система обнаружения дорожных знаков

реализована по вышеописанной схеме и состоит из двух блоков: блок обучения и блок обнаружения.

Блок обучения, в свою очередь, работает в два этапа.

1. Этап извлечения признаков для обучения. На этом этапе дескриптор на основе вейвлета Хаара извлекает для каждого изображения из обучающего набора вектор признаков. Обучающая база данных содержит подборку черно-белых позитивных изображений (рис. 1, а, с дорожными знаками) и негативных (рис. 1, б, где дорожные знаки отсутствуют).



Рис. 1. Позитивные изображения (а); негативные изображения (б)

2. Этап обучения. Векторы из первой фазы составляют основу для алгоритма обучения искусственной нейронной сети (ИНС). Архитектура выбранной искусственной нейронной сети представляет собой многослойный перцептрон, который доказал свою надежность и дает быстрые результаты в различных приложениях в области обработки сигналов и изображений.

Блок обнаружения также работает в два этапа.

1. Этап извлечения признаков для обнаружения. Изображение, которое содержит или не содержит дорожные знаки, сканируется скользящим окном, имеющим тот же размер, что и на этапе извлечения признаков для обучения. Затем дескриптор Хаара используется для извлечения вектора признаков из каждого изоб-

ражения для формирования базовых тестовых векторов исходного изображения.

2. Этап обнаружения. Искусственная нейронная сеть, обученная ранее, выполняет классификацию всех сцен, на которых изображены дорожные знаки или на которых их нет.

Обобщенная схема процесса поддержки принятия решений приведена на рис. 2.

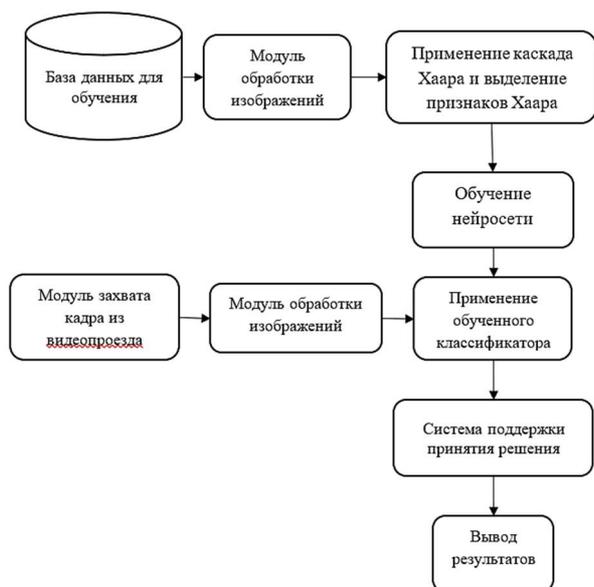


Рис. 2. Обобщенная схема процесса поддержки принятия решения

Признаки Хаара

Признаки Хаара — прямоугольные примитивы со значением, вычисляемым по формуле:

$$F = X - Y, \quad (1)$$

где F — значение признака; X — сумма значений пикселей, закрываемых светлой частью признака; Y — сумма значений пикселей, закрываемых темной частью признака Хаара — подобные элементы предоставляют информацию о распределении уровней серого в двух соседних областях изображения (рис. 3).

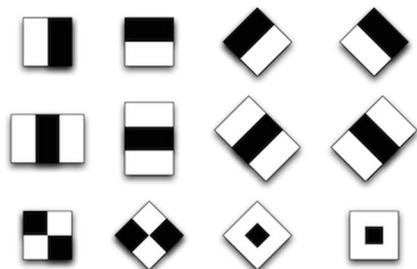


Рис. 3. Примеры Хаара-подобных примитивов

Первым шагом в вычислении характеристик Хаара является использование концепции

интегрального изображения (уравнение 2), введенной Виолой и Джонсом, которая позволяет быстро производить расчет суммарной яркости прямоугольного фрагмента изображения, причем размер фрагмента не влияет на скорость расчета.

Интегральное представление изображения является матрицей того же размера, что и исходное изображение, каждый элемент которой содержит сумму яркостей всех пикселей, находящихся левее и выше данного, и рассчитывается по следующей формуле:

$$I(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} i(x', y'), \quad (2)$$

где $I(x, y)$ — это интегральное изображение; $i(x, y)$ — значение интенсивности исходного изображения.

Интегральное представление позволяет быстро рассчитывать суммарную яркость произвольного прямоугольника на данном изображении, причем время расчета не зависит от площади прямоугольника. Интегральное представление изображения представляет собой матрицу, совпадающую по размерам с исходным изображением. В каждом элементе матрицы хранится сумма интенсивностей всех пикселей, находящихся левее и выше данного элемента.

Применение уравнения позволяет рассчитать окна Хаара в различных масштабах:

$$s(x, y) = s(x, y-1) + i(x, y) \quad (3)$$

$$I(x, y) = I(x-1, y) + s(x, y) \quad (4)$$

где $s(x, y)$ обозначает кумулятивную сумму строки, причем $s(x, -1) = I(-1, y) = 0$.

Оригинальный подход состоит в том, чтобы использовать только 2 прямоугольных фильтра (горизонтальный и вертикальный) в разных масштабах: 2x2, 4x4, 8x8 и 16x16. Детали изображения фильтруются, сохраняя при этом наиболее важные края, поскольку размер фильтра увеличивается вдвое.

Полученная в результате сборка Хаара-подобных элементов с использованием двух прямоугольных фильтров показана на рис. 4.



Рис. 4. Выделение векторов с помощью двух фильтров

Выделенные векторы являются входными векторами в процессе обучения и обнаружения для искусственной нейронной сети или для обучающих изображений размером 24x24 пикселя или фрагментов такого размера, извлеченных из тестового изображения.

Искусственная нейронная сеть

На сегодняшний день список областей применения нейросетевых технологий постоянно увеличивается. Искусственная нейронная сеть является отличным средством решения задач по распознаванию образов и дальнейшей обработке изображения. Одним из преимуществ ИНС является то, что ошибка отдельно взятого нейрона не нарушит результат распознавания, так как каждый нейрон связан с другим только из ближайшей окрестности. Другим преимуществом ИНС является скорость вычисления, потому что при таком подходе обработка информации происходит большим количеством нейронов, которые соединены между собой. Для того чтобы ИНС работала для любого приложения области искусственного интеллекта, требуется процесс обучения. Этот процесс включает в себя настройку весов связей между нейронами, называемыми синоптическими весами. В данной системе обнаружения дорожных знаков использована архитектура многослойного перцептрона (рис. 5). В этой архитектуре в дополнение к входному и выходному слоям используются промежуточные слои, называемые скрытым слоем [5].

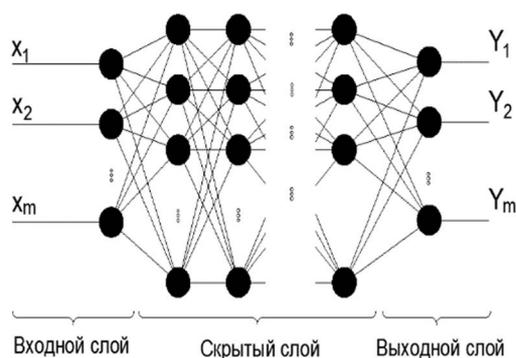


Рис. 5. Архитектура ИНС

Архитектура использует многослойный алгоритм обучения перцептрона методом обратного распространения ошибки (Back pro). Его идея заключается в том, что каждый элемент вносит свой "вклад" в ошибку следующего элемента. Поэтому весовые коэффициенты скрытого элемента следует скорректировать

пропорционально его "вкладу" в величину ошибки следующего слоя. Следовательно, выходной элемент с большей ошибкой делает больший "вклад" в ошибку того элемента скрытого слоя, который связан с ним большим по величине весом [5, 6]. Значение этой ошибки будет полезно для настройки весов связей между нейронами, чтобы минимизировать общую ошибку.

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} (dj(n) - yj(n))^2, \quad (5)$$

где $E(n)$ — квадратичная ошибка, $(dj(n))$ — требуемый ответ для обучающего образца, $yj(n)$ — действительный ответ сети.

ИНС типа многослойного перцептрона использовались для обучения и обнаружения дорожных знаков. ИНС изучает различные сцены (кадры из видеопотока) из набора данных (обучающий набор), а затем обобщает их обучение для обнаружения дорожных знаков на тестовом изображении.

Заключение

В данной статье представлен подход к разработке модели распознавания дорожных знаков при автоматизированном составлении паспорта дороги. Разработана структура системы поддержки принятия решения обнаружения дорожных знаков. Была применена комбинация дескриптора Хаара-подобного классификатора на основе искусственного нейрона. Применение многослойных нейронных сетей позволяет разработать быструю и надежную систему обнаружения дорожных знаков.

Литература

1. Триведи М.М. Системы защиты пешеходов: проблемы, исследования и проблемы // Интеллектуальные транспортные системы, транзакции IEEE. 2007. 8 (3). С. 413-430.
2. Барабанов В.Ф., Калашников А.О., Нужный А.М. Сбор и автоматизированная обработка данных электромагнитного сканирования с последующей визуализацией // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 32-36.
3. Bolotova Yu.A., Kermani A.K., Spitsyn V.G. Colored background symbols recognition on the base of hierarchical temporal memory model with Gabor filter preprocessing // Electromagnetic Waves and Electronic Systems. 2012. № 1. Vol. 17. pp. 14-19 [In Russian]
4. Головки В.А. Нейроинтеллект: теория и применение. Кн. 1: Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями. Брест: БПИ, 1999. 260 с.
5. Головки В.А. Нейроинтеллект: теория и применение. Кн. 2: Самоорганизация, отказоустойчивость и применение нейронных сетей. Брест: БПИ, 1999. 228 с.

Информация об авторах

Калашников Артемий Олегович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: kalashnikovart1306@gmail.com

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

Нужный Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: nam14@mail.ru

Барabanov Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: bav33@mail.ru

DECISION MAKING SUPPORT IN THE IMAGE RECOGNITION SYSTEM USING AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

A.O. Kalashnikov, V.F. Barabanov, A.M. Nuzhnyy, A.V. Barabanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers issues of creating a decision support system for the preparation of the passport of a road. One of the tasks solved in the process of passporting a motorway is to fill data on the presence and location of structures, road engineering devices, including road signs. The system is designed for automated analysis of the video flow to highlight frames containing road signs, as well as the subsequent classification of the found characters. We give an original two-stage system for extracting and classifying images containing road signs. The detection algorithm for the desired images is based on the use of Haar's wavelet transforms and the concept of an integrated image, which allows one to get the required frames as quickly as possible. The originality of the use of Haar signs is to use only 2 rectangular filters (horizontal and vertical) on different scales: 2x2, 4x4, 8x8 and 16x16. Subsequent data processing, the purpose of which is the classification of the found images, is carried out using an artificial neural network. The relevance of the development of such a decision support system is determined by the need to process large volumes of video data. The system allows one to largely eliminate the factor of user errors, which is very important since the data obtained affect the safety of the road

Key words: image recognition, Haar features, neural networks, machine learning

References

1. Trivedi M.M. "Pedestrian protection systems: problems, research and challenges", *Intelligent Transport Systems, IEEE Transactions (Intellektual'nye transportnye sistemy, tranzaktsii IEEE)*, 2007, no. 8 (3), pp. 413-430
2. Barabanov V.F., Kalashnikov A.O., Nuzhnyy A.M. "Obtaining and automatization of data processing from electromagnetic scanning of road pavements with subsequent visualization", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5, pp. 32-36.
3. Bolotova Yu.A. Kermani A.K., Spitsyn V.G. "Colored background symbols recognition on the base of hierarchical temporal memory model with Gabor filter preprocessing", *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2012, vol. 17, no. 1, pp. 14-19.
4. Golovko V.A. "Neurointelligence: theory and application. Book 1: Organization and training of neural networks with direct and feedback" ("Neyrointellekt: teoriya i primeneniye. Kn. 1: Organizatsiya i obuchenie neyronnykh setey s pryamymi i obratnymi svyazyami"), Brest, BPI, 1999, 260 p.
5. Golovko V.A. "Neurointelligence: theory and application. Book 2: Self-organization, fault tolerance and the use of neural networks" ("Neyrointellekt: teoriya i primeneniye. Kn. 2: Samoorganizatsiya, otkazoustoychivost' i primeneniye neyronnykh setey"), Brest, BPI, 1999, 228 p.

Submitted 03.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Vladimir F. Barabanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

Artemiy O. Kalashnikov, graduate student, Voronezh State Technical University ((84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kalashnikovart1306@gmail.com

Aleksandr M. Nuzhnyy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University ((84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nam14@mail.ru

Aleksandr V. Barabanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bav33@mail.ru

ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ НА ОСНОВЕ ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

С.И. Носков

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Аннотация: описываются свойства методов оценивания параметров регрессионных моделей – наименьших квадратов, модулей, антиробастного, а также их применения для решения конкретных практических проблем. При этом метод наименьших модулей не реагирует на аномальные наблюдения выборки, метод антиробастного оценивания сильно отклоняет линию регрессии в их направлении, метод наименьших квадратов занимает промежуточное положение. Показано, что если целью построения модели является проведение на ее основе многовариантных прогнозных расчетов значений зависимой переменной, то выбор метода численной идентификации параметров модели следует производить на основе анализа характера выбросов. Если есть основания полагать, что подобные им ситуации могут иметь место в будущем, следует выбрать метод антиробастного оценивания, в противном же случае – метод наименьших модулей. Построена регрессионная модель грузооборота Красноярской железной дороги на основе применения всех трех методов оценивания параметров. Проведен анализ причин, имеющих место в 2010 году в ситуации резкого падения величины грузооборота, которая вполне может характеризоваться как аномальное наблюдение в данных. Сделаны рекомендации по выбору метода оценивания параметров в этом случае

Ключевые слова: регрессионная модель, методы наименьших квадратов, модулей, антиробастного оценивания, выброс, прогнозирование, грузооборот

Введение

Методы регрессионного анализа давно и эффективно применяются при анализе сложных систем самого различного характера и масштаба. Наиболее популярным методом оценивания неизвестных параметров регрессионных моделей является метод наименьших квадратов (МНК). Так, с его помощью построена модель продаж [1]. В работе [2] построены регрессионные модели рельсовой колеи в зависимости от числа проходов вагона-путеизмерителя линейного, полиномиального и логарифмического типов. В [3] представлена модель топливно-скоростных свойств грузовых автотранспортных средств серийного производства в системе автомобиль-дорога. Регрессионные модели специализированного биометеорологического показателя для погодноклиматических условий Арктики в зимний период разработаны в [4]. Менее часто построение регрессионных моделей осуществляется посредством применения метода наименьших модулей (МНМ). Так, в работе [5] описана модель условного среднего экономического ущерба муниципальных образований Свердловской области от пожаров. В [6] показана возможность эффективного применения МНМ при решении задач обработки и анализа изображений. В [7] решена задача оценивания тен-

зора инерции орбитальной станции «Мир» по данным измерений кинетического момента. В работе [8] приведен весьма интересный обзор публикаций по вопросам применения методов регрессионного анализа в технической сфере. В частности, рассмотрены следующие модели: взаимосвязи характеристик обрабатываемого материала и технологических режимов лазерного упрочнения с глубиной поверхностного слоя; плотности имитационного шпика; длительности опорожнения ёмкости смесителя от остатков (выгрузки) при приготовлении зерновой смеси при производстве комбикормов; вычисления температуры вспышки в закрытом тигле; влияния факторов условий эксплуатации на температуру поверхности автомобильного генератора; мониторинга графиков движения поездов по критерию энергетической эффективности; определения рациональных конструктивных параметров рифлёного валька. Одним из наименее популярных методов построения регрессионных моделей является метод антиробастного оценивания, основанный на расстоянии Чебышева между фактическими и расчетными значениями выходного фактора. Так, в работе [9] он применяется для моделирования валового регионального продукта Иркутской области. В [10] с его помощью построена модель объема погрузки грузов на железнодорожном транспорте. В работах [11-15] рассмотрены различные алгоритмические аспекты применения этого метода.

При построении каждой конкретной регрессионной модели исследователь, располагая прикладными программами, в которых реализованы МНК, МНМ, МАО, встает перед выбором – какой из этих методов предпочесть при оценивании модельных параметров? Один из возможных подходов к решению этого вопроса предлагается в настоящей работе.

Свойства МНК, МНМ и МАО по реакции на аномальные наблюдения

Рассмотрим обязательную составляющую любой регрессионной модели некоторого реального объекта – уравнение (зависимость) вида:

$$y_k = \sum_{i=1}^m \alpha_i x_{ki} + \varepsilon_k, k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где y – зависимая, а x_i – i -ая независимая переменные; α_i – i -ый подлежащий оцениванию параметр; ε_k – ошибки аппроксимации, k – номер наблюдения, n – число наблюдений (длина выборки).

Представим уравнение (1) в векторной форме:

$$y = X\alpha + \varepsilon, \quad (2)$$

где $y = (y_1, \dots, y_n)^T$, $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)^T$, $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)^T$, X – $(n \times m)$ -матрица с компонентами x_{ij} .

Рассмотрим вкратце основные задачи, которые можно решить с помощью уравнения (1). Прежде всего, оно позволяет оценить характер и степень влияния каждой независимой переменной x_i на выходной фактор y . Действительно, если $\alpha_i > 0$, это влияние положительно, то есть с ростом i -го независимого (входного) фактора переменная y возрастает, если же $\alpha_i < 0$ – убывает, то есть его влияние отрицательно. Сравнение величин $|\alpha_i \bar{x}_i|$, где \bar{x}_i – среднее на выборке значение i -го фактора, позволяет соотнести степень влияния каждой независимой переменной на зависимую.

Часто регрессионные модели строятся с целью кратко-, средне- или долгосрочного прогнозирования значений выходных переменных. При этом сам процесс прогнозирования состоит в следующем [16]. Вначале исследователь разрабатывает сценарии проведения многовариантных прогнозных расчетов, в рамках которых производится задание значений независимых переменных модели. Затем эти заданные величины подставляются в зависимость (1) и производится расчет значений выходной переменной y . Такая стратегия прогнозирования вполне оправдана лишь в том слу-

чае, когда есть все основания полагать, что тенденции, имеющие место на предыстории процесса, проявятся и на периоде прогнозирования. В противном случае следует при построении модели привлекать наряду со статистической еще и экспертную информацию относительно возможной смены этих тенденций в будущем (см., например, [17-19]).

Подлежащая обработке выборка данных – пара (X, y) , – может содержать аномальные наблюдения, называемые также выбросами (см., например, [20]), то есть наблюдения, не согласующиеся с остальными. Основными причинами их присутствия в данных могут быть две. Одна, субъективная, является следствием либо ошибок в деятельности соответствующих статистических служб, либо сбоям в работе задействованных технических средств. Другая, объективная, является действительным проявлением характера изучаемого объекта или процесса. И если в первом случае наблюдение-выброс можно просто удалить из выборки, то во втором следует «встроить» его в алгоритмическую схему оценивания параметров модели путем выбора соответствующего метода.

Перечисленные выше методы оценивания параметров уравнения (1) по-разному реагируют на аномальные наблюдения в выборке (см., например, [21-25]). Метод наименьших модулей такие наблюдения просто «не замечает», полностью их игнорируя и придавая им неявным образом нулевой вес. Метод антиробастного оценивания (и это отражено уже в самом его названии) сильно к ним тяготеет, смещая линию регрессии в направлении аномалий. Метод же наименьших квадратов занимает в определенной мере промежуточную в этом отношении позицию, являясь своего рода компромиссом между МНМ и МАО.

Разумеется, в модели можно отразить присутствие в данных выбросов, используя различные преобразования переменных [14, 15].

Таким образом, при выборе метода оценивания параметров регрессионной модели следует вначале определиться с тем, содержит ли анализируемая выборка выбросы, и если «да», то каков их характер, действительно ли их присутствие связано с некими конкретными причинами, проявление которых и отразилось на данных. Затем, если в дальнейшем построенную модель предполагается применять для решения практических проблем, связанных с прогнозированием будущего поведения объек-

та анализа, имеет смысл выяснить, не будут ли эти причины проявляться и в дальнейшем, на периоде упреждения прогноза. И если будут, следует из перечисленных трех методов оценивания выбрать MAO. При отрицательном же ответе на этот вопрос выбор должен быть сделан в пользу МНМ. Наконец в случае, если у исследователя возникнут сомнения в том, будут ли в будущем иметь место ситуации, аналогичные тем, которые сопровождались появлением аномалий в данных, следует, гарантируя себя от серьезных ошибок, предпочесть МНК.

Учет выброса при построении регрессионной модели грузооборота Красноярской железной дороги

В работе [26] с помощью МНК построена регрессионная модель грузооборота Красноярской железной дороги по статистической информации за 2001-2019 гг. Несколько видоизменим состав объясняющих переменных этой модели. Введем обозначения:

y – грузооборот (млн. т км);

x_1 – прием порожних вагонов (ваг.);

x_2 – среднесуточный пробег локомотива (км);

x_3 – эксплуатируемый парк локомотивов (шт.).

Отметим, что в анализируемых данных присутствует явное аномальное наблюдение - в 2010 г. наблюдалось существенное, на 8%, падение грузооборота при его стабильном увеличении во все остальные годы. Причем этот факт имел вполне объяснимую причину. Дело в том, что именно в этом году произошло снижение многих экономических показателей в стране, вызванное последствиями кризиса 2008-2009 гг. В данном случае такое отложенное последствие кризиса связано с наличием у основных грузоотправителей Восточного полигона долгосрочных контрактов. Поэтому по окончании выполнения основных обязательств поставок угля в страны АТР произошла ребалансировка портфелей поставок с учётом профицита запасов, создавшихся в прошлые годы. После нормализации запасов был продолжен долгосрочный восходящий тренд роста грузооборота.

Проанализируем, каким образом указанный выброс отразился на значениях параметров регрессионной модели грузооборота, оцененных на основе применения МНК, МНМ и MAO.

а) МНК

$$y = -45826.4 + 23.1x_1 + 41.66x_2 + 88.21x_3, \quad (3)$$

$$R=0.97, E=3.14, M=48500.75, K=234202439.23, O=10174.68.$$

Здесь под уравнением (3) приведены значения традиционных для регрессионных моделей критериев их адекватности:

R – значение критерия множественной детерминации;

E – средняя относительная ошибка аппроксимации;

M – сумма модулей ошибок;

K – сумма квадратов ошибок;

O – максимальная по модулю ошибка.

б) МНМ

$$y = -38125.9 + 26.3x_1 + 41.86x_2 + 50.18x_3, \quad (4)$$

$$E=2.86, M=42897.58, K=271929446.59,$$

$$O=12548.94.$$

в) MAO

$$y = -3777.8 + 22.3x_1 - 23.6x_2 + 108.8x_3, \quad (5)$$

$$E=5.24, M=77930.71, K=433600433.47,$$

$$O=6555.20.$$

Проведем краткий анализ уравнений (3) – (5). Прежде всего отметим, что в перечне критериев адекватности для моделей (4) и (5) отсутствует критерий R , не имеющий смысла для методов наименьших модулей и антиробастного оценивания. Далее, знаки параметров уравнений (3) и (4) совпадают, относительно близки значения как этих параметров, так и критериев адекватности. Уравнение же (5) сильно отличается от (3) и (4). Прежде всего, сменился на отрицательный знак при переменной x_2 , при этом резко возросло влияние на выходной показатель фактора x_3 . Главное же, значительно ухудшились значения критериев E , M и K при весьма существенном, почти в два раза, уменьшении максимальной по модулю ошибки. А она во всех трех случаях как раз и соответствует наблюдению-выбросу, имеющему место в 2010 году.

Общий вывод относительно того, какую из приведенных выше трех альтернативных моделей грузооборота Красноярской железной дороги выбрать при ее использовании в режиме прогнозирования, можно сформулировать следующим образом. Если в прогнозном периоде следует ожидать повторения ситуации, аналогичной той, которая сложилась в 2010 г., выбрать следует модель (5). Если такого повторения, по мнению исследователя, не произойдет, выбор должен быть сделан в пользу модели (4). Наконец, в случае, если указанная ситуация в какой-то мере возможна и в будущем, следует принять компромиссное решение – выбрать модель (3).

Заключение

В работе рассмотрены свойства наиболее часто используемых методов идентификации неизвестных параметров регрессионных уравнений и их применение для решения некоторых прикладных проблем. Отмечено, что метод наименьших модулей не реагирует на аномальные наблюдения выборки, метод антиробастного оценивания сильно отклоняет линию регрессии в их направлении, метод наименьших квадратов занимает промежуточное положение.

Получены следующие результаты

1. Установлено, что если целью построения модели является проведение на ее основе многовариантных прогнозных значений зависимой переменной, то выбор метода численной идентификации параметров модели следует производить на основе анализа причин выбросов. Если подобные им ситуации будут иметь место в будущем, следует выбрать метод антиробастного оценивания, в противном же случае – метод наименьших модулей. Метод наименьших квадратов является своего рода компромиссом между ними.

2. Построена регрессионная модель грузооборота Красноярской железной дороги в трех вариантах. Проведен анализ причин резкого падения величины грузооборота в 2010 году, которое может характеризоваться как аномальное наблюдение в данных. Сделаны рекомендации по выбору метода оценивания параметров в этом случае.

Литература

1. Жуковский А.Г., Золотых О.А., Проскурин А.В. Получение математической модели продаж на основе регрессионного анализа // Евразийский союз ученых. 2019. № 4-3 (61). С. 40-43.
2. Сычев В.П., Дудник В.В., Кузнецова Н.В. Регрессионные модели изменения состояния рельсовой колеи с оценкой точности прогнозирования по построенным моделям // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2019. Т. 14. № 14 (14). С. 187-198.
3. Коноплев В.Н. Методика идентификации сложной системы автомобиль-дорога на основе использования однофакторных регрессионных моделей и моделей брандона // Грузовик. 2010. № 3. С. 21-26.
4. Шипко Ю.В., Шувакин Е.В., Шуваев М.А. Регрессионные модели оценки безопасности работ персонала на открытой территории в жестких погодных условиях // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 1 (1). С. 131-140.
5. Азарян А.А. Быстрые алгоритмы моделирования многомерных линейных регрессионных зависимо-

стей на основе метода наименьших модулей: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 2018.

6. Сурин В.А., Тырсин А.Н. Применение обобщенного метода наименьших модулей в задачах обработки и анализа изображений // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 2. С. 45–55.

7. Применение метода наименьших модулей в задаче оценивания тензора инерции орбитальной станции 'Мир' по данным измерений кинетического момента / Е.Ю. Чебукова, В.В. Сазонов, М.Ю. Беляев, С.Г. Зыков // Препринт ИПМ № 13. Москва, 1994.

8. Караулова А.В., Базилевский М.П. Применение регрессионного анализа при решении реальных задач технического характера // Молодая наука Сибири. 2020. № 3 (9). С. 229-236.

9. Баенхаева А.В., Базилевский М.П., Носков С.И. Моделирование валового регионального продукта Иркутской области на основе применения методики множественного оценивания регрессионных параметров // Фундаментальные исследования. 2016. № 10-1. С. 9-14.

10. Перфильева К.С., Хоняков А.А. Моделирование объема погрузки на железнодорожном транспорте // Молодая наука Сибири. 2020. № 3 (9). С. 223-228.

11. Базилевский М.П. Сведение задачи отбора информативных регрессоров при оценивании линейной регрессионной модели по методу наименьших квадратов к задаче частично-булевого линейного программирования // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2018. Т. 6. № 1 (20). С. 108-117.

12. Базилевский М.П. Исследование однофакторных регрессионных моделей с параметрами в виде матриц линейных операторов двумерного векторного пространства // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. 2020. № 2 (7). С. 1-13.

13. Носков С.И., Перфильева К.С. Эмпирический анализ некоторых свойств метода смешанного оценивания параметров линейного регрессионного уравнения // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 6 (108). С. 62-66.

14. Базилевский М.П., Носков С.И. Алгоритм формирования множества регрессионных моделей с помощью преобразования зависимой переменной // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. № 3. С. 159-160.

15. Базилевский М.П., Носков С.И. Алгоритм построения линейно-мультипликативной регрессии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 1 (29). С. 88-92.

16. Носков С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. Иркутск: Облформпечать, 1996. 320 с.

17. Головченко В.Б., Носков С.И. Выбор класса линейной по параметрам регрессии на основе экспертных высказываний // Кибернетика и системный анализ. 1992. №5. С.109-115.

18. Головченко В.Б., Носков С.И. Комбинирование прогнозов с учетом экспертной информации // Автоматика и телемеханика. 1992. №11. С.109-117.

19. Головченко В.Б., Носков С.И. Оценивание параметров эконометрической модели по статической и экспертной информации // Автоматика и телемеханика. 1991. №4. С.123-132.

20. Демиденко Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981. 302с.

21. Носков С.И. Метод антиробастного оценивания параметров линейной регрессии: число максимальных по модулю ошибок аппроксимации // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 1. С. 51-54.

22. Миллер Б.М., Колосов К.С. Робастное оценивание на основе метода наименьших модулей и фильтра Калмана // Автоматика и телемеханика. 2020. № 11. С. 72-92.

23. Тырсин А.Н. Робастное построение регрессионных зависимостей на основе обобщенного метода наименьших модулей // Записки научных семинаров Санкт-Петербургского отделения математического института им. В.А. Стеклова РАН. 2005. Т. 328. № 9. С. 236-250.

24. Базилевский М.П. Исследование возможности оценивания моделей парной линейной регрессии со стохастическими переменными методом наименьших модулей // Вопросы естествознания. 2017. № 2 (14). С. 9-15.

25. Горяинов А.В., Горяинова Е.Р. Сравнение эффективности оценок методов наименьших модулей и наименьших квадратов в авторегрессионной модели со случайным коэффициентом // Автоматика и телемеханика. 2016. № 9. С. 84-95.

26. Носков С.И., Врублевский И.П. Анализ регрессионной модели грузооборота железнодорожного транспорта // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 1 (79). С. 86-90.

Поступила 01.03.2021; принята к публикации 14.04.2021

Информация об авторах

Носков Сергей Иванович – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15), e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru, тел. +7 (3952) 638-322, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>.

CHOOSING A METHOD FOR ESTIMATING THE PARAMETERS OF LINEAR REGRESSION BASED ON IDENTIFICATION OF ANOMALOUS OBSERVATIONS

S.I. Noskov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Abstract: the article describes the properties of methods for estimating the parameters of regression models - least squares, moduli, anti-robust - as well as their application for solving specific practical problems. At the same time, the method of least modules does not respond to anomalous observations of the sample, the method of anti-robust estimation strongly deviates the regression line in their direction, the method of least squares occupies an intermediate position. I show that if the purpose of constructing a model is to carry out multivariate predictive calculations of the values of the dependent variable on its basis, then the choice of a method for the numerical identification of model parameters should be based on an analysis of the nature of emissions. If there is a reason to believe that similar situations may occur in the future, the anti-robust estimation method should be chosen, otherwise - the least modulus method. I built a regression model of the freight turnover of the Krasnoyarsk railway on the basis of the application of all three methods of parameter estimation. I carried out the analysis of the reasons for the situation of a sharp drop in the value of cargo turnover in 2010, which may well be characterized as anomalous observation in the data. I give recommendations on the choice of the parameter estimation method in this case

Key words: regression model, least squares methods, modules, anti-robust estimation, outlier, forecasting, cargo turnover

References

1. Zhukovskiy A.G., Zolotykh O.A., Proskurin A.V. "Obtaining a mathematical model of sales based on regression analysis", *Eurasian Union of Scientists (Evraziyskiy soyuz uchenykh)*, 2019, no. 4-3 (61), pp. 40-43.
2. Sychev V.P., Dudnik V.V., Kuznetsova N.V. "Regression models of changes in the state of the rail track with an assessment of the forecasting accuracy using the constructed models", *Implementation of Modern Designs and Advanced Technologies in Track Facilities (Vnedrenie sovremennykh konstruktiv i peredovykh tekhnologiy v putevoe khozyaystvo)*, 2019, vol. 14, no. 14 (14), pp. 187-198.
3. Konoplev V.N. "A technique for identifying a complex car-road system based on the use of one-factor regression models and brandon models", *Truck (Gruzovik)*, 2010, no. 3, pp. 21-26.
4. Shipko Yu.V., Shuvakin E.V., Shuvaev M.A. "Regression models for assessing the safety of personnel in an open area in severe weather conditions", *Aerospace forces. Theory and practice (Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika)*, 2017, no. 1 (1), pp. 131-140.
5. Azaryan A.A. "Fast algorithms for modeling multivariate linear regression dependencies based on the method of least modules" ("Bystrye algoritmy modelirovaniya mnogomernykh lineynykh regressiionnykh zavisimostey na osnove metoda naimen'shikh moduley"), Cand. of Physical-Mat. Sci. dis., Ekaterinburg, 2018.
6. Surin V.A., Tyrsin A.N. "Application of the generalized method of least modules in problems of image processing and analysis", *Bulletin of Astrakhan State Technical University (Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, no. 2, pp. 45-55.

7. Chebukova E.Yu., Sazonov V.V., Belyaev M.Yu., Zykov S.G. "Application of the method of least moduli in the problem of estimating the tensor of inertia of the orbital station 'Mir' from the data of measurements of the angular momentum", *Preprint IPM no. 13*, Moscow, 1994.
8. Karaulova A.V., Bazilevsky M.P. "Application of regression analysis in solving real technical problems", *Young Science of the Siberia (Molodaya nauka Sibiri)*, 2020, no. 3 (9), pp. 229-236.
9. Baenkhaeva A.V., Bazilevskiy M.P., Noskov S.I. "Modeling of the gross regional product of the Irkutsk region based on the application of the method of multiple estimation of regression parameters", *Fundamental Research (Fundamental'nye issledovaniya)*, 2016, no. 10-1, pp. 9-14.
10. Perfil'eva K.S., Khonyakov A.A. "Modeling the volume of loading on railway transport", *Young Science of the Siberia (Molodaya nauka Sibiri)*, 2020, no. 3 (9), pp. 223-228.
11. Bazilevskiy M.P. "Reduction of the problem of selection of informative regressors in the estimation of a linear regression model using the least squares method to a problem of partial-Boolean linear programming", *Modeling, Optimization and Information Technologies (Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2018, vol. 6, no. 1 (20), pp. 108-117.
12. Bazilevskiy M.P. "Investigation of one-factor regression models with parameters in the form of matrices of linear operators of a two-dimensional vector space", *Information Technology and Mathematical Modeling in the Management of Complex Systems (Informatsionnyye tekhnologii i matematicheskoe modelirovaniye v upravlenii slozhnyimi sistemami)*, 2020, no. 2 (7), pp. 1-13.
13. Noskov S.I., Perfil'eva K.S. "An empirical analysis of some properties of the method of mixed estimation of parameters of a linear regression equation", *Science and Business: Ways of Development (Nauka i biznes: puti razvitiya)*, 2020, no. 6 (108), pp. 62-66.
14. Bazilevskiy M.P., Noskov S.I. "Algorithm for the formation of a set of regression models using the transformation of the dependent variable", *International Journal of Applied and Fundamental Research (Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy)*, 2011, no. 3, pp. 159-160.
15. Bazilevskiy M.P., Noskov S.I. "Algorithm for constructing linear multiplicative regression", *Modern Technologies. System Analysis. Modeling (Sovremennyye tekhnologii. Sistemyy analiz. Modelirovaniye)*, 2011, no. 1 (29), pp. 88-92.
16. Noskov S.I. "A technology for modeling objects with unstable functioning and uncertainty in data" ("Tekhnologiya modelirovaniya ob'ektov s nestabil'nym funktsionirovaniem i neopredelennost'yu v dannykh"), Irkutsk, Oblinformpechat', 1996, 320 p.
17. Golovchenko V.B., Noskov S.I. "The choice of a class of regression linear in parameters based on expert statements", *Cybernetics and Systems Analysis (Kibernetika i sistemnyy analiz)*, 1992, no. 5, pp.109-115.
18. Golovchenko V.B., Noskov S.I. "Combining forecasts taking into account expert information", *Automation and Telemechanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 1992, no.11, pp.109-117.
19. Golovchenko V.B., Noskov S.I. "Estimation of parameters of an econometric model based on static and expert information", *Automation and Telemechanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 1991, no. 4, pp. 123-132.
20. Demidenko E.Z. "Linear and nonlinear regression" ("Lineynaya i nelineynaya regressii"), Moscow, Finansy i statistika, 1981, 302p.
21. Noskov S.I. "The method of anti-robust estimation of linear regression parameters: the number of approximation errors maximum modulo", *Yuzhno-Siberian Scientific Bulletin (Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik)*, 2020, no. 1, pp. 51-54.
22. Miller B.M., Kolosov K.S. "Robust estimation based on the method of least modules and Kalman filter", *Automation and Remote Control (Avtomatika i telemekhanika)*, 2020, no. 11, pp. 72-92.
23. Tyrsin A.N. "Robust construction of regression dependencies based on the generalized least modulus method", *Notes of Scientific Seminars of the St. Petersburg V.A. Steklov Institute of RAS (Zapiski nauchnykh seminarov Sankt-Peterburgskogo otdeleniya matematicheskogo instituta im. V.A. Steklova RAN)*, 2005, vol. 328, no. 9, pp. 236-250.
24. Bazilevskiy M.P. "Investigation of the possibility of estimating paired linear regression models with stochastic variables by the least modules method", *Questions of Natural Science (Voprosy yestestvoznaniya)*, 2017, no. 2 (14), pp. 9-15.
25. Goryainov A.V., Goryainova E.R. "Comparison of the efficiency of estimates of the least modulus and least squares methods in an autoregressive model with a random coefficient", *Automation and Remote Control (Avtomatika i telemekhanika)*, 2016, no. 9, pp. 84-95.
26. Noskov S.I., Vrublevskiy I.P. "Analysis of the regression model of freight turnover of railway transport", *Bulletin of Transport of the Volga region (Vestnik transporta Povolzh'ya)*, 2020, no. 1 (79), pp. 86-90.

Submitted 01.03.2021; revised 14.04.2021

Information about the author

Sergey I. Noskov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Irkutsk State Transport University (15 Chernyshevskogo str., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru, tel. +7 (3952) 638-322, <https://orcid.org/0000-0003-4097-2720>.

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ТИРИСТОРНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ МОЩНОСТИ АВТОКЛАВНЫХ УСТАНОВОК**В.Л. Бурковский¹, Ю.В. Нефедов¹, Ань Ту Ха¹, В.Н. Крысанов²**¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**²**ООО ПКФ «Современные Технологии», г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассматривается вопрос комплексного принципа управления силовыми тиристорными регуляторами мощности автоклавных установок по производству полимерно-композитного материала. Для повышения уровня энергосбережения в асинхронных двигателях оборудования автоклава предлагается оригинальный алгоритм коммутации тиристорных ключей типового регулятора мощности на основе дополнительного использования системы импульсно-фазового управления, существенно снижающей токовую перегрузку. Для оценки эффективности предложенного алгоритма был определен уровень дополнительных потерь электроэнергии в асинхронных двигателях на основе сравнительного анализа повышенных значений его фазных токов во время переходного процесса. Разработанная имитационная модель автоматизированной системы управления автоклавом показала возможности данного алгоритма обеспечить требуемое демпфирование нежелательных переходных процессов в асинхронных двигателях, вызванных параллельной работой мощных термоэлектрических нагревателей и, как следствие, снижение дополнительных потерь электроэнергии. Разработанный алгоритм управления типового регулятора мощности автоклава позволяет обеспечить повышение уровня энергосбережения при постоянном контроле и корректировке гармонического состава напряжения электрооборудования установки. На основании результатов проведенного имитационного моделирования определены значения снижения среднецикловых дополнительных потерь электроэнергии в асинхронном двигателе вентилятора автоклава при поддержании требуемого уровня электромагнитной совместимости силового оборудования

Ключевые слова: управление, алгоритм, регулятор мощности, высшие гармоники, автоклавная установка, имитационное моделирование

Введение

Российская Федерация, более чем какое-либо другое развитое государство мира, заинтересовано в интенсивном развитии выпуска товаров и разнообразной продукции собственного производства, максимальной независимости от импортных поставок, особенно в ряде стратегических направлений. Политическая ситуация после 2014 г. на международном уровне показала крайне опасные тенденции для РФ с финансовой и промышленной точки зрения из-за импортной зависимости. В результате были приняты меры на законодательном уровне в виде вступления в силу закона о промышленной политике в РФ (N 488-ФЗ от 31 декабря 2014 г.). И уже с 2015 года началось создание правительственных комиссий по импортозамещению во многих отраслях РФ. Данная тема приобретает особую актуальность именно сейчас для стратегических материалов и технологий. Одно из ведущих мест этого списка занимают композиционные материалы из углепластика, позволяющие создавать легкие детали, по прочности превосходящие металлические. Они широко применя-

ются в авиационной, космической, военной промышленности, а также в перспективных технологических разработках народного хозяйства. Для производства полимерно-композитных материалов (ПКМ) используются разнообразные по производительности и конструкциям автоклавные установки. Однако с учетом жесткой технологии им всем присущ характерный структурный состав обязательного оборудования: нагревательные элементы, электрические вентиляторы и компрессоры, задача которых – создание равномерного теплового поля и определенной конкретным рецептом среды внутри автоклава. В производстве зачастую используются установки автоклава импортного производства европейских компаний, но есть и успешные отечественные модели. Например, уникальный автоклав, созданный компанией «Курганхиммаш». Можно отметить, что конструкция и материалы всех автоклавов созданы с учетом важности вопросов снижения потерь тепла во время процесса реакции. Вопросы энергосбережения в автоклавных установках крайне важны, т.к. доля затрат на используемую электроэнергию (ЭЭ) при производстве ПКМ составляет большую часть себестоимости готовой продукции. В связи с чем важно совершенствовать не только технологию производства ПКМ, но и реализовывать со-

временные аппаратные решения и принципы управления установками по снижению дополнительных потерь ЭЭ при работе автоклавов.

Постановка задачи

Как было отмечено выше, основными элементами автоклава являются мощные термоэлектрические нагреватели (ТЭН), полупроводниковые устройства для регулирования их мощности, вентиляторы с регулируемым электроприводом (как правило, с асинхронным двигателем АД) и система управления всем электрическим оборудованием. Обычно электрическая мощность потребляемая ТЭН в 5-7 раз превышает суммарную электрическую мощность, потребляемую всеми остальными элементами автоклава. С точки зрения энергосбережения вопросы экономии ЭЭ потребляемой ТЭН лежат в плоскости обеспечения максимальной теплоизоляции емкости автоклава. А вот для снижения потерь ЭЭ в асинхронном электроприводе мощных вентиляторов автоклавной установки необходимо максимально оптимизировать работу системы управления как ТЭН, так и АД по критерию снижения потерь ЭЭ. Эта задача многофакторная, и многие вопросы уже нашли свое решение [1-4]. В данной работе будет рассмотрен вопрос повышения уровня энергосбережения типовых автоклавных установок на основе снижения отрицательного влияния работы полупроводниковых регуляторов мощности ТЭН на дополнительные потери ЭЭ в АД вентиляторов.

Анализ работы автоклавных установок среднего класса (для мелкосерийного производства ПКМ, мощность ТЭН $P=550$ кВт, мощность двух АД вентиляторов $P=90$ кВт) показал особенность их работы, заключающуюся в существенном влиянии полупроводникового регулятора мощности (ПРМ) на входное напряжение АД вентилятора. Это явление связано с принципом работы ПРМ. Напряжение, подаваемое на ТЭН, регулируется с помощью изменения количества включенных интервалов тиристорных ключей, т.е. реализуется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) напряжения, питающего ТЭН. В свою очередь, при такой модуляции напряжения в моменты подключения ТЭН к сети наблюдается значительная просадка напряжения на АД вентилятора, который сидит на одной шине с нагревателями. Необходимо отметить, что двигатель, включенный параллельно мощным ТЭН и при постоянных ко-

лебаниях регулируемого напряжения с субчастотой $f = 2-5$ Гц, находится в режиме периодических переходных процессов напряжения на АД фазных токов. А в соответствии с типовой U-образной характеристикой АД (рис. 1) это сопровождается и подобными переходными процессами фазных токов [5].

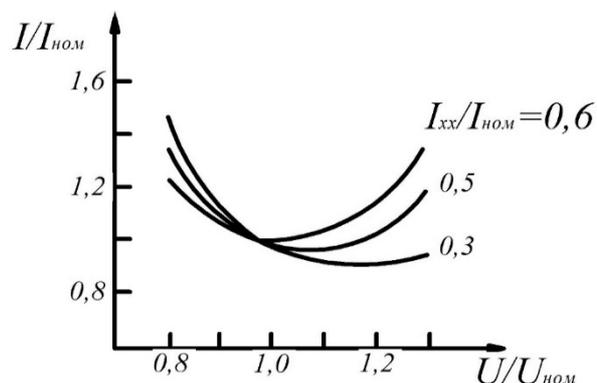


Рис. 1. Зависимость фазного тока АД от напряжения питания

Эффект постоянного колебания напряжения будет тем значительней, чем меньше запас по установленной мощности имеет цеховой питающий трансформатор. Для такого случая на рис. 2 показаны графики напряжения и тока имитационной модели ТЭН и АД при работе ПРМ в режиме ШИМ.

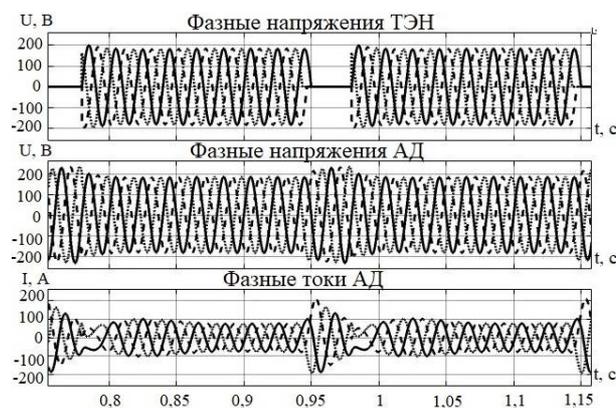


Рис. 2. Токи и напряжения имитационной модели автоклавной установки

Как видно из полученных диаграмм имитационной модели автоклавной установки, периодические подъемы напряжения сопровождаются большим увеличением фазных токов АД и в соответствии с теорией электропривода данные переходные процессы будут характеризоваться существенными дополнительными пусковыми потерями ЭЭ [6, 7].

Это связано с физикой электромеханического преобразования энергии в АД, когда во время указанных переходных процессах реализуются динамические нагрузки, увеличение момента двигателя, кратковременные перегрузки двигателя, вызывающие значительное увеличение интегральных потерь энергии в двигателе и снижение его КПД. Для количественного учета влияния переходных процессов в АД на нагрев двигателя требуется расчет энергии потерь в двигателе и его цепях за время переходного процесса, с учетом его каталожных данных. Далее будет проведена качественная оценка дополнительных потерь ЭЭ в АД на основе сравнительного анализа повышенных значений его фазных токов во время переходного процесса.

Учитывая, что в соответствии с технологией автоклавного производства ПКМ (по нагреву и вентиляции) ПРМ и АД практически постоянно включены в период работы установки, то целесообразно предусмотреть дополнительные схмотехнические и алгоритмические решения для снижения этих дополнительных потерь в АД вентиляторов.

Решение сформулированной задачи

Для решения сформулированной выше задачи, предложен новый алгоритм управления тиристорными группами ПРМ, при реализации которого могут быть существенно снижены значения фазных токов АД (и соответственно – дополнительные потери ЭЭ) в моменты отключения ТЭН.

Как было отмечено выше, типовой ПРМ обеспечивает регулирование мощности нагрева ТЭН путем ШИМ напряжения питания. Подключение ТЭН к сети сопровождается просадкой напряжения на обмотках АД вентилятора, а отключение ТЭН от сети сопровождается резким подъемом напряжения на обмотках АД вентилятора и, как следствие, переходным процессом с увеличенными фазными токами. Для снижения их уровня представляется целесообразным реализовать плавное понижение напряжения на выходе ПРМ как минимум в двух – трех периодах питающего напряжения, следующих после отключения ТЭН. Такое плавное снижение уровня напряжения питания АД возможно реализовать без применения дополнительной силовой аппаратуры на базе штатного ПРМ, применив лишь модернизированный алгоритм работы тиристорных ключей (ТК) с использованием импульсно-фазового управления ИФУ (рис. 3).

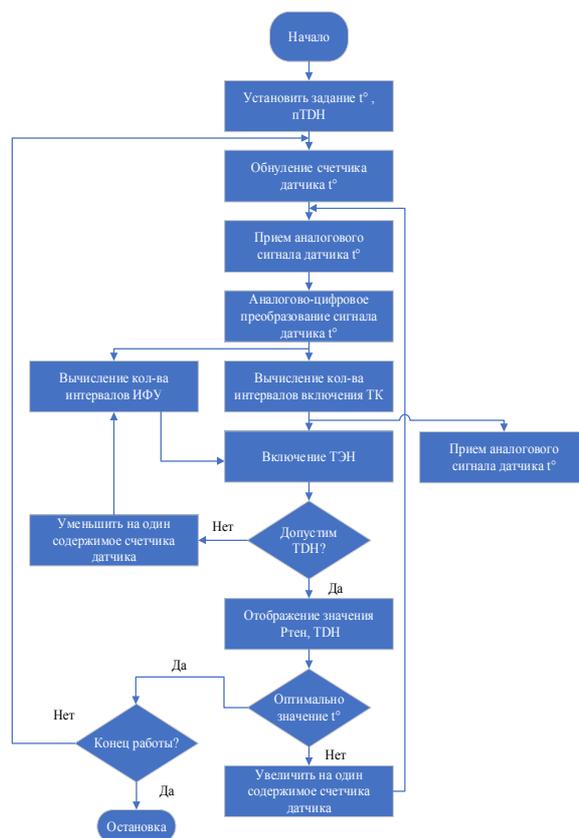


Рис. 3. Алгоритм работы системы управления ПРМ автоклава

В штатной системе управления ПРМ поддержание требуемой температуры в емкости автоклава реализуется за счет задания в начале цикла уставки параметра температуры, а также предельно допустимого уровня высших гармонических (пТДН). Далее сигнал задания сравнивается с оцифрованным сигналом реальной температуры в автоклаве и вырабатывается сигнал управления на требуемую мощность (количество интервалов включенного состояния ТК) электрических нагревателей. Параллельно включается АД вентилятора, создавая равномерный нагрев изделий. Как было отмечено выше, для снижения дополнительных потерь в АД от переходных процессов при отключении ТЭН каждый рабочий интервал включения нагревателей оканчивается несколькими полупериодами работы ТК в режиме ИФУ с нарастающей величиной угла открытия силовых тиристорov. Это демпфирует переходные процессы фазных токов. Однако при задании малых температур (режим понижения температуры) возможна ситуация, когда количество полупериодов работы ТК в режиме широтной модуляции сравнимо или меньше количества полупериодов работы ТК в режиме ИФУ. В этом случае значения ТДН будут превышать уровни, нормируемые ГОСТом [8]. Для поддержания

заданного уровня пТДН, предложенный алгоритм уменьшает количество полупериодов работы ТК в режиме ИФУ. После отработки циклов формирования оптимального, по критерию заданной температуры и заданного уровня пТДН, режима энергосберегающего управления ТК (с малым перерегулированием фазных токов АД в переходных процессах) параметры текущих значений мощности нагрева ТЭН и уровня ТДН напряжения на АД выводятся на дисплей управляющего комплекса автоклава. При снятии сиг-

нала задания по температуре все счетчики обнуляются, сигналы управления снимаются с ТК и вентилятора – происходит остановка работы оборудования нагрева автоклава.

Для подтверждения эффективности предложенного принципа энергоэффективного управления ПРМ было проведено имитационное моделирование основных элементов силового электрического оборудования автоклавной установки в программной среде MatLab Simulink [9-11] (рис. 4).

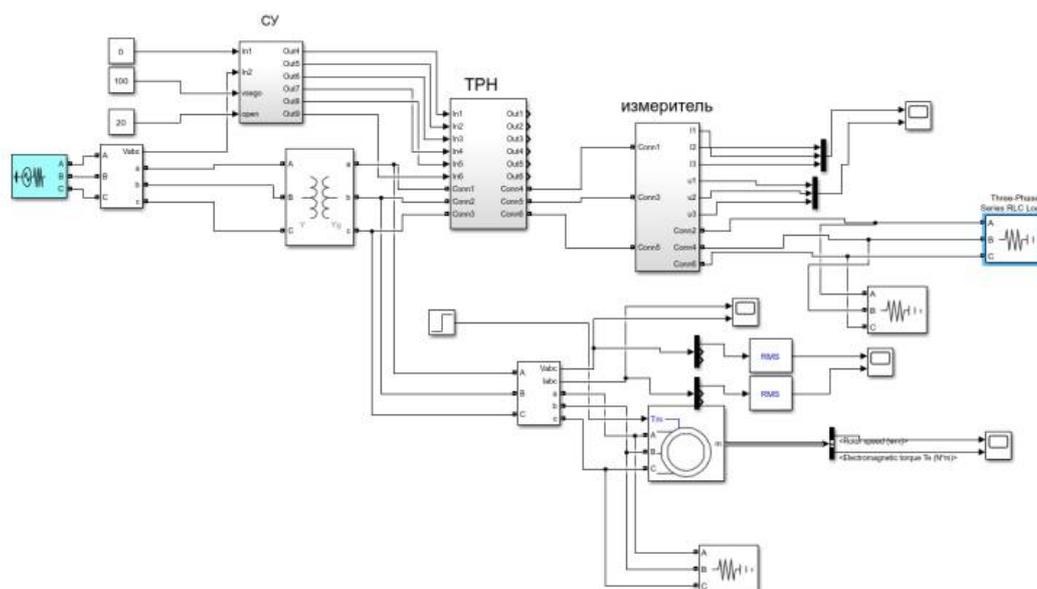


Рис. 4. Имитационная модель электрической части автоклавной установки

Основными элементами модели являются система цехового электроснабжения в виде генератора и согласующего силового трансформатора ($S = 630$ кВА), регулятор мощности ТРН, ТЭН ($P = 550$ кВт, обозначены RLC Load), АД вентилятора ($P = 2 \times 45$ кВт), измерители тока и напряжения АД и ТЭН, а также уровня искажения формы напряжения на выходе полупроводникового регулятора мощности ТРН (измеряется суммарный коэффициент гармоник ТДН типовым программным блоком Fast fourier transform, обозначенный на рис. 4 «измеритель»). Указанный блок «измеритель» выполняет необходимую функцию ограничения количества полупериодов и величины углов отпирания тиристорных ключей ПРМ в случае, когда величина ТДН начинает превышать установленный ГОСТом уровень 8% в предложенном режиме энергосберегающего управления [8, 12].

В ходе имитационного моделирования режимов работы автоклава были реализованы различные вариации таких параметров, как задаваемая выходная мощность ТЭН, соотношения мощностей ТЭН, АД и питающего транс-

форматора, тактовая частота ШИМ ПРМ, количество полупериодов и величины углов отпирания тиристорных ключей ПРМ при переводе его на импульсно-фазовое управление. Результаты моделирования переводились в графический формат диаграмм токов и напряжений контрольных точек ТЭН и АД. Для примера на рис. 5 представлены диаграммы фазных токов и напряжений ТЭН и АД для варианта плавного снижения напряжения на выходе ПРМ в течение трех периодов после отключения ТЭН.

В данном случае были установлены углы отпирания тиристорных ключей: 50,120,150 эл. градусов (такая вариация оптимальна с точки зрения уровня действующего значения напряжения и уровня искажения его формы). Реализация такого принципа управления ключами сопровождается более плавным переходным процессом напряжения питания АД и, как следствие, не наблюдается значительное увеличение кратности его фазных токов. Сравнение переходных процессов предложенного и исходного принципов управления (например, по диаграммам рис. 4 и рис. 5) позволяет оценить уровень снижения

средней величины кратности фазных токов АД на 25-47%. Усреднено при десятипериодном тактовом интервале работы ПРМ такое снижение уровня переходных токов позволит снизить дополнительные потери ЭЭ в АД на 39-53%.

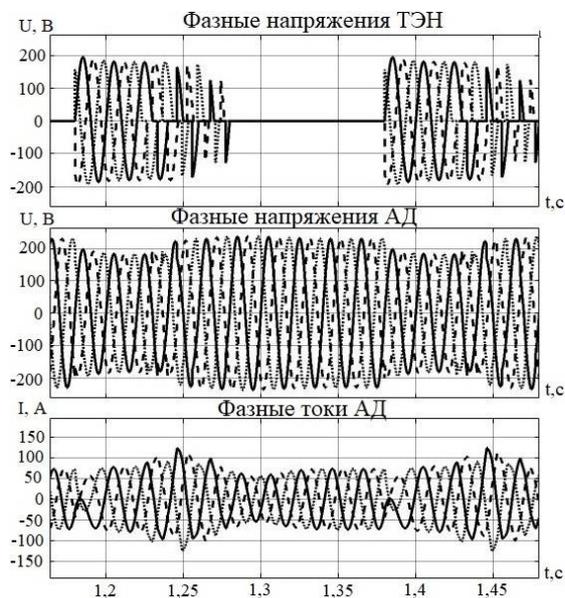


Рис. 5. Переходные процессы токов и напряжений имитационной модели автоклавной установки в режиме энергосберегающего управления

Выводы

1. На основании анализа основных энергетических параметров силового оборудования типового автоклава выявлено наличие субгармонических колебаний напряжения АД электропривода вентилятора, приводящих к дополнительным потерям электроэнергии.

2. Для повышения уровня энергосбережения АД автоклава предложен принцип демпфирования нежелательных переходных процессов в АД при работе тиристорного регулятора мощности автоклавной установки в режиме широтно-импульсного управления.

3. Разработан специальный алгоритм работы системы управления тиристорного регулятора мощности с использованием импульсно-фазового управления.

4. Определен (39-53 %) уровень снижения дополнительных потерь электроэнергии в АД вентилятора автоклава при гарантированном поддержании нормируемого ГОСТом предельно допустимого значения суммарного коэффициента гармоник.

Литература

1. Нефедов Ю.В., Хайченко И.А., Бабенко В.В. Концептуальные вопросы энергосбережения в автоклавных установках производства полимерно-композитных материалов // Энергобезопасность и энергосбережения. 2020. № 4. С. 20-23.
2. Беляевский Р.В. Анализ влияния коэффициента загрузки асинхронных двигателей на потребление реактивной мощности // Вестник Кузбасского гос. тех. ун-ва. 2010. № 6. С. 66 – 69.
3. Optimization of Electric Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of Torque and Flux Dependent Losses / N. T. Hung, N. C. Thien, T. P. Nguyen, V. S. Le, D. A. Tuan // AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences. 2013. Pp. 497–507.
4. Хайченко И.А., Бабенко В.В., Нефедов Ю.В. Практические вопросы эксплуатации статических преобразователей для объектов промышленности // Технические науки: проблемы и решения: сб. материалов XXXVIII междунар. науч.-практ. конф. М., 2020. С. 89-99.
5. Sun D.S. Research on Voltage-Chopping and Energy-Saving Controlling Technology for Three-Phase AC Asynchronous Motor // Advanced Materials Research. 2012. Pp. 1033–1037.
6. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 368 с.
7. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энерго-атомиздат, 1985. 560 с.
8. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
9. Терехин В.Б. Моделирование электропривода в SIMULINK (MATLAB 7.0.1). Томск: НИТГУ, 2010. 110 с.
10. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб: КОРОНА принт, 2001. С. 320.
11. Atif Iqbal, Haitham Abu-Rub, Jaroslaw Guzinski. High Performance Control of AC Drives with Matlab // Simulink Models WILEY. 2018. P. 502.
12. Крысанов В.Н., Нефедов Ю.В., Романов А.В. Контроль параметров электромагнитной совместимости модернизированного оборудования автоклавной установки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 77-81.

Поступила 01.02.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах

Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: bvl@vorstu.ru, тел. 8-(473) 255-77-25

Нефедов Юрий Васильевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: nefedowjuri@yandex.ru, тел. 8906-673-44-40

Ань Ту Ха – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: haanhtu2509ru@gmail.com, тел. 8951-850-41-66

Крысанов Валерий Николаевич – канд. техн. наук, директор, ООО ПКФ «Современные технологии» (394026, Россия, г. Воронеж, проспект Труда, д. 65, корпус 4), e-mail: sovteh2000@mail.ru, тел. 8920-228-56-06, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8402>

ALGORITHMIZATION OF ENERGY-SAVING CONTROL OF THYRISTOR POWER REGULATORS OF AUTOCLAVE PLANTS

V.L. Burkovskiy¹, Yu.V. Nefedov¹, An Tu Ha¹, V.N. Krysanov²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²LC “Modern Technologies”, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the issue of the complex principle of thyristor power control of autoclave units for the production of polymer-composite material. To increase the level of energy saving in asynchronous motors of the autoclave equipment, we offer an original algorithm for switching thyristor keys of a typical power regulator based on the additional use of a pulse-phase control system that significantly reduces current overload. To evaluate the efficiency of the proposed algorithm, we determined the level of additional power losses in asynchronous motors based on a comparative analysis of the increased values of its phase currents during the transition process. The developed simulation model of the automated autoclave control system showed the capabilities of this algorithm to provide the required damping of undesirable transients in asynchronous motors caused by the parallel operation of powerful thermoelectric heaters and, as a result, reducing additional power losses. The developed control algorithm of a typical autoclave power regulator allows us to ensure an increase in the level of energy saving with constant monitoring and correction of the harmonic composition of the voltage of the electrical equipment of the plant. Based on results of simulated simulation, we determined values of reduction of average cycle additional losses of electric power in asynchronous motor of autoclave fan while maintaining required level of electromagnetic compatibility of power equipment

Key words: control, algorithm, power regulator, higher harmonics, autoclave installation, simulation

References

1. Nefedov Yu.V., Khaychenko I.A., Babenko V.V. “Conceptual issues of energy conservation in autoclave installations for the production of polymer-composite materials”, *Energy Security and Energy Conservation (Energobezopasnost' i energoberezheniya)*, 2020, no. 4, pp. 20-23
2. Belyaevskiy R.V. “Analysis of the effect of the load factor of asynchronous motors on reactive power consumption”, *Bulletin of Kuzbass State Technical university (Vestnik Kuzbasskogo gos. tekhn. univ.)*, 2010, no. 6, pp. 66-69
3. Hung N.T., Thien N.C., Nguyen T.P., Le V.S., Tuan D.A. “Optimization of electric energy in three-phase induction motor by balancing of torque and flux dependent losses”, *AETA 2013: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences*, pp. 497-507.
4. Khaychenko I.A., Babenko V.V., Nefedov Yu.V. “Practical issues of operation of static converters for industrial facilities”, *Proc. of the XXXVIII Int. Sci. and Practical Conf.: Technical Sciences: Problems and Solutions (Tekhni-cheskie nauki: problemy i resheniya: sb. materialov XXXVIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Moscow, 2020, pp. 89-99
5. Sun D.S. “Research on voltage-chopping and energy-saving controlling technology for three-phase AC asynchronous motor”, *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 1033-1037. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.433-440.1033
6. Moskalenko V.V. “Electric drive” (“Elektricheskiy privod”), Moscow, Akademiya, 2007, 368 p.
7. Klyuchev V.I. “Theory of electric drive” (“Teoriya elektroprivoda”), Moscow, Energoatomizdat, 1985, 560 p.
8. GOST 32144-2013 “Electrical power. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electric energy in general-purpose power supply systems”, Moscow, Standartinform, 2014, 16 p.
9. Teryokhin V.B. “Modeling of the electric drive in SIMULINK (MATLAB 7.0.1)” (“Modelirovanie elektroprivoda v SIMULINK (MATLAB 7.0.1)”), Tomsk, NITPU, 2010, 110 p.
10. German-Galkin S.G. “Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0” (“Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0”), St. Petersburg, CORONA print, 2001, 320 p.
11. Atif Iqbal, Haitham Abu-Rub, Jaroslaw Guzinski “High performance control of AC drives with Matlab”, *Simulink Models* WILEY, 2018, 502 p.
12. Krysanov V.N., Nefedov Yu.V., Romanov A.V. “Control of electromagnetic compatibility parameters of modernized autoclave installation equipment”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 77-81.

Submitted 01.02.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

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

Yuriy V. Nefedov, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nefedovjuriy@yandex.ru, tel. +7906-673-44-40

An Tu Ha, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: haanhtu2509ru@gmail.com, tel. +7951-850-41-66

Valeriy N. Krysanov, Cand. Sc. (Technical), director, LC “Modern Technologies” (56, b. 4 Truda prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sovteh2000@mail.ru, tel. +7920-228-56-06, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8402>

ОБЗОР АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТОМ НА ОСНОВЕ ПОЛЕЗНОСТИ И ДЕРЕВА ПОВЕДЕНИЯ

А.К. Донских, В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, М.А. Белых

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: проектирование искусственного интеллекта (ИИ) является необходимым процессом в разработке практически любой интерактивной системы моделирования. Если системы проектирования FSM или Behavior Tree не вызывают вопросов, то с Utility AI все сложнее. Предложено единое средство для проектирования как Behavior Tree, так и Utility-based AI. Предлагается вариант системы для проектирования как Behavior Tree AI, так и для Utility AI. Предложено несколько способов проектирования Utility AI (визуальное проектирование, текстовое описание, создание системы на языке программирования), представлены их преимущества и недостатки. Рассмотрен более предпочтительный вариант для разработчика - с визуальным проектированием - система Utility AI, состоящая из набора узлов: Data Source (DS), Scorer, Action. Отмечено, что за проектирование и работу ИИ отвечают две разные системы. Первая система проектирования является самой простой. Вторая, более важная и более сложная система, – это работающий в реальном времени контроллер. Рассмотрены упрощенные алгоритмы для контроллеров Behavior Tree и Utility AI. Использование контроллеров скажется положительным образом на повышении удобства и производительности дизайнера искусственного интеллекта

Ключевые слова: система принятия решений, Utility AI, дерево поведения, визуальное программирование

Введение

Практически любая система, включающая в себя работу ИИ, должна иметь возможность его дизайна. Существуют различные подходы к системам ИИ, их внутренней архитектуры, а также к средствам для их проектирования и конфигурации.

На текущий момент самыми совершенными системами являются Behavior Tree и Utility-based AI. Данные системы имеют мало общего, в отличие, например, Finite State Machine и Behavior Tree, которые оперируют состояниями и переходами, а отличаются только в некоторых нюансах работы. Utility AI ничего неизвестно о состояниях и, соответственно, переходах между состояниями. Utility AI оперирует действиями и оценками (количественное измерение полезности) этих действий.

Как правило, описание конкретной модели Utility-based AI представляют в виде таблицы, где в первой колонке указано название действия, во второй - название оценки, а в третьей - полезность этой оценки (табл. 1). Behavior Tree же изображают в виде графа, где вершины могут быть как selector (проверками условий), так и действиями (рис. 1).

Проектирование ИИ

Однако, несмотря на разные подходы к работе ИИ, можно предложить единое средство для проектирования как Behavior Tree, так и Utility-based AI. С дизайном системы визуального проектирования Behavior Tree проблем возникнуть не должно, так его можно визуальным образом представить в виде ориентированного графа. Utility AI также можно представить в виде графа. Оценки будут являться вершинами графа, которые соединены с другими оценками, или действиями, и рассчитываются по определенным правилам в процессе обхода графа.

Как видно из табл. 1, для Utility AI имеется набор действий, оценок для каждого действия и очков. Возможны различные системы, например, в которых оценки сразу выдают и количество очков, которые затем могут либо суммироваться, либо перемножаться.

Можно предложить несколько способов проектирования Utility AI. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

1. Визуальное проектирование. Создается граф, связывающий между собой действия и их оценки. Имеет низкий порог вхождения для дизайнера ИИ, но слабую расширяемость.

2. Текстовое описание. Описание действий и их оценок с помощью текста, например, в формате xml. Имеет большой порог вхождения для дизайнера ИИ, но зато выше расширяемость.

3. Программирование на языке программирования. Все действия и их оценки программируются на выбранном языке программирования, например, создаются как экземпляры

какого-либо класса. Имеет наивысшую расширяемость, но дизайнер ИИ должен знать выбранный язык программирования.

Таблица 1

Модель Utility-based AI

Действие	Оценщик	Оценка
Двигаться к врагу	Дистанция до врага	0-100
	Оружие заряжено	-100
Стрелять по врагу	Расстояние до врага ≤ 50	75
	Нет возможности перейти в укрытие	50
	Оружие не заряжено	-125
Перейти в укрытие	Сейчас вне укрытия	50
	Расстояние до укрытия ≤ 50	50
Перезарядить оружие	Оружие не заряжено	75
	Сейчас в укрытии	50
	Оружие заряжено	-125

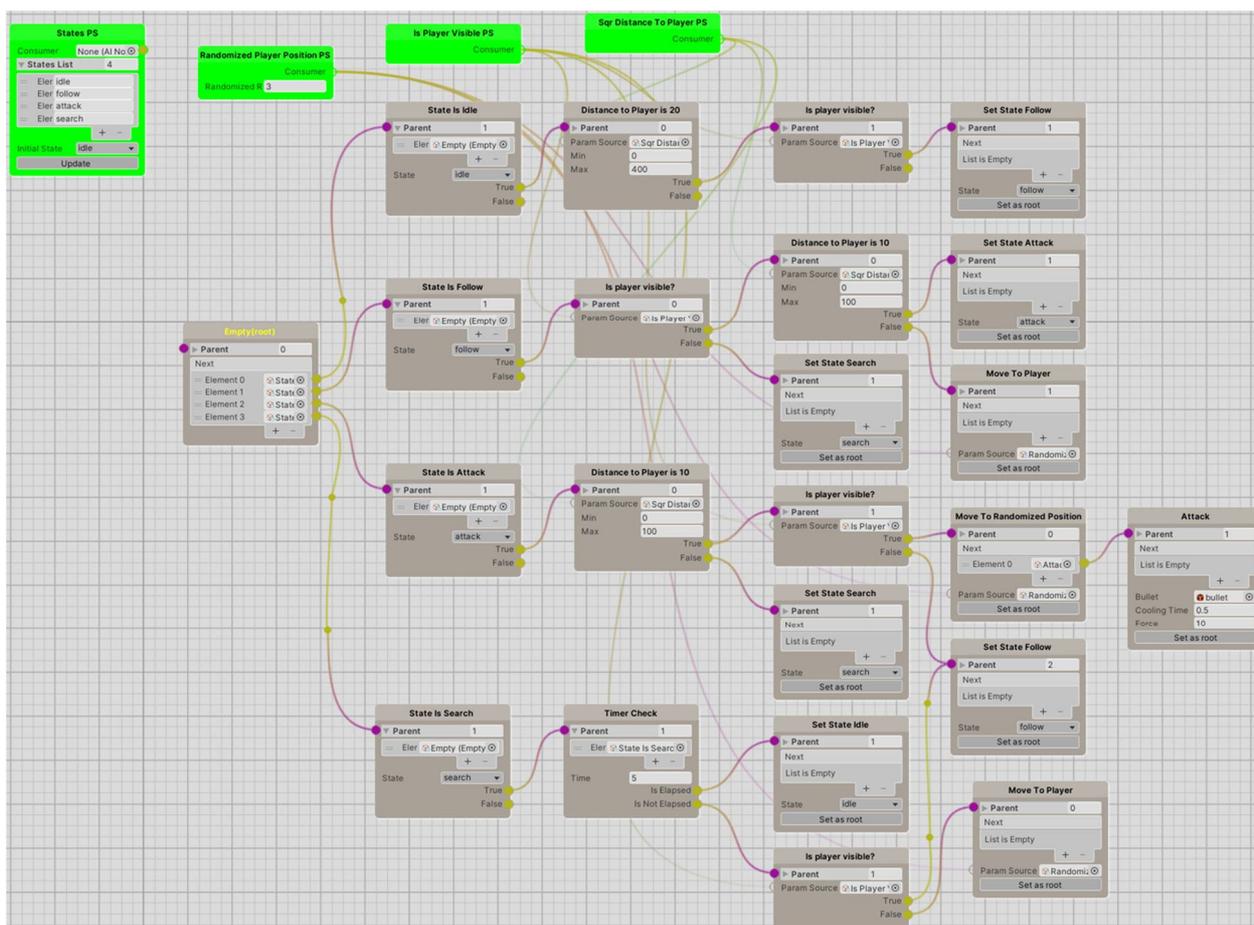


Рис. 1. Схема Behavior Tree

Визуальное проектирование

Рассмотрим вариант с визуальным проектированием. Система Utility AI с возможностью

визуального проектирования представлена на рис. 2.

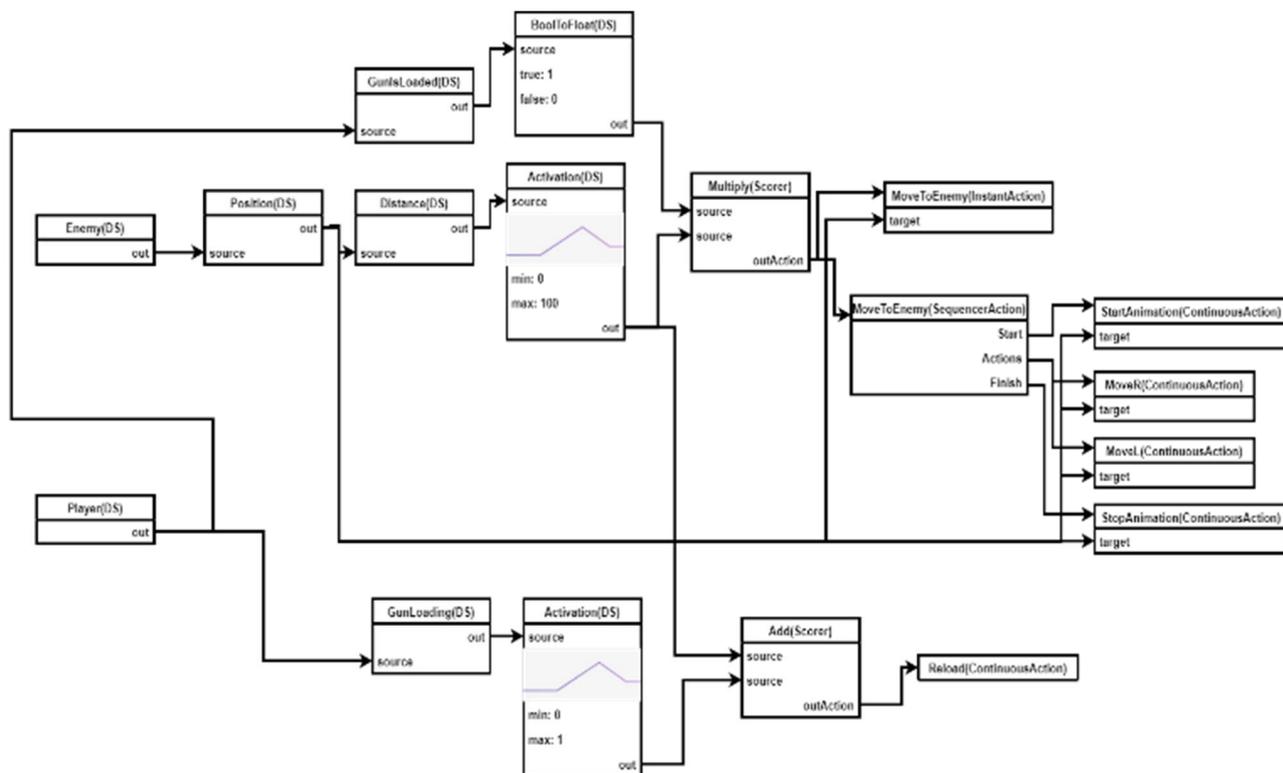


Рис. 2. Схема Utility AI

Предложенная система состоит из следующих узлов [5]:

1. **DataSource (DS)**. Используется для получения данных из окружения, например, позиция врага или расстояния до ближайшего укрытия. Могут соединяться с другими DataSource, тем самым образуя цепь преобразований.

2. **Scorer**. На входе принимают числа с плавающей точкой и суммируют, либо перемножают их. Могут соединяться с другими Scorer.

3. **Action**. Собственно, это само действие, полезность которого и рассчитывается. Могут быть различные типы действий, все зависит от конкретной задачи. Например: **InstantAction** - сделал и забыл, **SequencerAction**, выполняет последовательность действий и т.д.

Описание работы системы

За проектирование и работу ИИ отвечают две разные системы. Так как представленное решение в первую очередь нацелено на работу с движком Unity3d, в который уже включено большинство систем, то система проектирования является самой простой. Основные моменты, которые стоит выделить: проверка типов и

выбор доступных нод. Проверка типов необходима для того, чтобы нельзя было соединить несовместимые ноды, например: DataSource, который возвращает Vector3, и DataSource, который принимает на входе Vector3 и возвращает magnitude, являются совместимыми, а вот magnitude выход нельзя будет соединить с точно такой же нодой. Выбор доступных нод просто проверяет, чтобы при выводе списка доступных к созданию нод не появлялись недоступные ноды. Например, при проектировании Behavior Tree не появлялись Action ноды из Utility AI.

Вторая, более важная и более сложная система – это работающий в реальном времени контроллер. Он отвечает как раз за обработку нод в реальном времени. В данный момент имеется два контроллера: BehaviorTreeController и UtilityAiController.

Для правильной работы систем оба контроллера должны вызывать методы из табл. 2, приведенной ниже. Также необходимо указать, что т.к. все ноды являются ScriptableObjects, то для получения информации об окружающем мире необходимо передавать контекст из контроллера во все методы. В контексте содержатся ссылки на ActorController и DataStoreObject. В DataStoreObject можно записывать нужную в процессе выполнения информацию, например,

промежуточные вычисления, ссылки на какие-либо компоненты, и передать таким образом

информацию из одного метода в другой.

Таблица 2

Описание функций классов

Класс	Родитель	Метод	Описание
abstractAINode		OnNodeInitialize	Отвечает за начальную инициализацию, получение необходимых сервисов и прочего
		OnNodeEnable	Пропагирует стандартный метод из Unity3d OnEnable
		OnNodeEnter	Вызывается в момент активации ноды
		OnNodeExit	Вызывается в момент деактивации ноды
		OnNodeDisable	Пропагирует стандартный метод из Unity3d OnDisable
		OnNodeDestroy	Пропагирует стандартный метод из Unity3d OnDestroy
BTNode	AINode	Next	Возвращает список следующих нод, которые необходимо выполнить
BTBlock	BTNode	DoWork	Аналог метода Update из Unity3d. Вызывается только в случае активации ноды
BTBlockCheck	BTNode	NextOne	То же самое, что и Next, только возвращает 1 ноду
abstractParamSource<T>	AINode	GetParam	Получение значения из контекста, например позиция объекта, расстояние и т.д.
abstract UAIAction	AINode	PerformAction	Метод вызывается для ноды, набравшей наибольшее количество очков

Упрощенный алгоритм для контроллера Behavior Tree следующий:

1. Инициализировать список ActiveNodes.
2. Инициализировать список currentActivatedNodes.
3. Присвоить переменной deactivateNodesList.
4. Занести в стек nodesStack корневую ноду, из которой начинается расчет.
5. Если стек пустой, то перейти к шагу 7.
6. Достать из стека nodesStack ноду и выполнить для нее следующее:

- если текущая нода имеется в списке deactivateNodesList, то удалить ее из этого списка, иначе вызвать метод onnodeenter для этой ноды;
- занести ноду в список currentactivatednodes;
- если нода является action нодой, то вызвать метод dowork для этой ноды;
- вызвать метод Next и занести результат в стек nodesStack.

7. Для всех нод в списке deactivateNodesList вызвать метод OnNodeExit.

Для Utility AI нод несколько другой жизненный цикл. Для Action нод отличий от BehaviorTree нет, методы работают точно также. Так как нельзя сказать, какой именно из Scorer или DataSource активен в данный момент, потому что они активны всегда, то соответственно и методы OnNodeEnter и OnNodeExit будут вызываться на каждом вызове метода Update стандартного Unity's MonoBehaviour.

Алгоритм для Utility AI еще проще, чем для Behavior Tree:

1. Получить список всех Action нод в графе, которые не имеют на входе другие Action ноды.

2. Для всех выбранных Action нод:

- подсчитать оценку для данной ноды;
- если оценка больше, чем уже рассчитанная максимальная, то данная нода будет являться лучшей.

3. Если выбранная лучшая нода не равняется предыдущей лучшей ноды, то вызвать для предыдущей ноды OnNodeExit, а для новой ноды метод OnNodeEnter

Также можно предложить небольшую оптимизацию. Так как граф может переиспользовать DataSource и Scorer, то следует кэшировать полученные значения при каждом вызове метода Update и очищать кэш в конце. Таким образом, жизненный цикл для всех нод представлен на рис. 3.

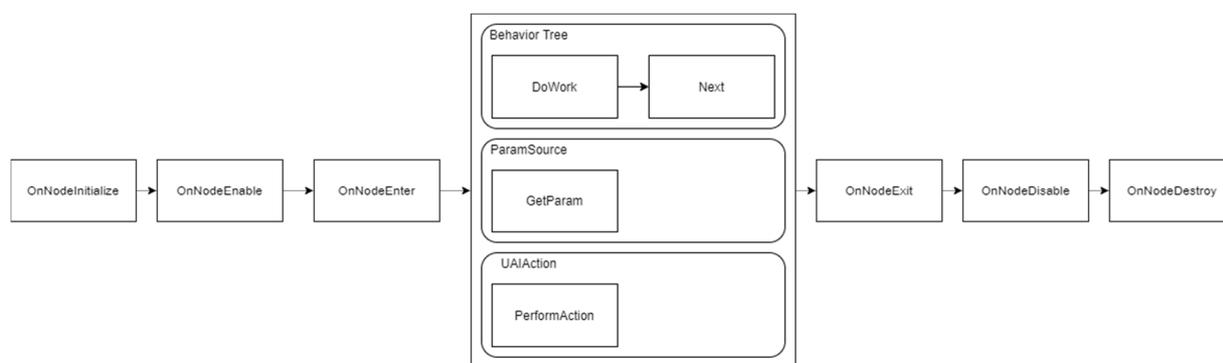


Рис. 3. Жизненный цикл для нод ИИ

Возможны различные модификации Utility AI контроллера. Например, можно использовать взвешенное случайное значение, и на основе его рандомизировать выбор лучшей Action ноды, тем самым сделав поведение NPC менее обдуманным и более реалистичным. А благодаря общей базе средств проектирования Behavior Tree и Utility AI их можно объединять, т.е. какой-либо DataSourceScorer, или даже Action может включать в себя использование другого UtilityAI или BehaviorTree. Например, в процессе выбора решения выбор пал на действие атака. Но у NPC есть несколько разных видов оружия и боеприпасов. Можно передать выбор лучшего оружия другой системе. Таким образом, можно разбивать систему на небольшие этапы, что скажется на повышении удобства и производительности дизайнера искусственного интеллекта.

Заключение

Предложенное решение для визуального проектирования искусственного интеллекта

предоставляет для дизайнера ИИ функциональные возможности простой и удобной, но в то же время всеохватывающей конфигурации, а для программиста простоту расширения уже имеющихся компонент двух подходов: Behavior Tree и Utility-based AI.

Литература

1. Steve Rabin. Game AI Pro 3 / Steve Rabin, David "Rez" Graham / A K Peters. CRC Press. 2017. Pp. 113-126.
2. Millington I. Artificial Intelligence for Games. London/ I. Millington, J. Funge, CRC Press. 2016. С. 37-38. [Электронный ресурс]. URL: <http://gameaibook.org/book.pdf#page=59>
3. Dill K., Martin L. A game AI approach to autonomous control of virtual characters. In Interservice // Industry Training, Simulation, and Education Conference (IITSEC), 2011.
4. Alexander B. The beauty of response curves. AI GameProgrammingWisdom. 2002. 450 с.
5. Донских А.К., Барабанов В.Ф. Цифровое управление искусственным интеллектом с использованием дерева поведения для расчета эвристик и проектирования стратегий Utility AI // Инженерные системы и сооружения. 2020. № 1 (38). С. 78-82.

Информация об авторах

Донских Андрей Константинович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: ak_donskikh@mail.ru

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

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

Белых Михаил Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: belykh.ma@yandex.ru

**INTELLIGENCE CONTROL ARCHITECTURE OVERVIEW
BASED ON UTILITY AND BEHAVIOR TREE**

A.K. Donskikh, V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, M.A. Belykh

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: designing artificial intelligence (AI) is a necessary process in the development of practically any interactive modeling system. The FSM or Behavior Tree design systems do not cause questions but everything is more complicated with Utility AI. We propose a single means for designing both Behavior Tree and Utility-Based AI. The article proposes a version of the system for designing both Behavior Tree AI and Utility AI. We give several ways of designing Utility AI (visual design, text description, creating a system in programming language), we considered their advantages and disadvantages. We considered a more preferred option for the developer - with visual design – Utility AI system consisting of a set of nodes: DataSource (DS), Scorer, Action. It is noted that two different systems are responsible for the design and operation of AI. The first design system is the simplest. The second, more important and more complex system is a real-time controller. We considered simplified algorithms for Behavior Tree and Utility AI controllers. The use of controllers will affect a positive way to improve the convenience and performance of an artificial intelligence designer

Key words: decision making system, Utility AI, behavior tree, visual programming

References

1. Rabin S., Graham D. “Game AI Pro 3”, A K Peters, CRC Press, 2017, pp. 113-126.
2. Millington I., Funge J. “Artificial Intelligence for Games”, London, CRC Press, 2016, pp. 37-38, available at: <http://gameaibook.org/book.pdf#page=59>
3. Dill K., Martin L. “A game AI approach to autonomous control of virtual characters”, *Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (IITSEC)*, 2011.
4. Alexander B. “The beauty of response curves”, *AI GameProgrammingWisdom*, 2002.
5. Donskikh A.K., Barabanov V.F. “ Digital control of artificial intelligence using a behavior tree to calculate heuristics and design strategies of Utility AI system”, *Engineering Systems and Constructions (Inzhenernye sistemy i sooruzheniya)*, 2020, no. 1 (38), pp. 78-82

Submitted 28.02.2021; revised 14.04.2021

Information about the authors

Andrey K. Donskikh, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ak_donskikh@mail.ru

Vladimir F. Barabanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru

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

Mikhail A. Belykh, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: belykh.ma@yandex.ru

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ КОМПЛЕКСА РАБОТ

С.А. Олейникова, И.А. Селищев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: статья посвящена разработке имитационной модели, позволяющей оценить вероятностно-временные показатели случайной величины, представляющей собой длительность выполнения комплекса последовательно-параллельных работ. В первую очередь, к таким показателям относятся закон распределения случайной величины (с точностью до параметров), вероятность завершения проекта в некотором временном интервале, а также математическое ожидание и дисперсия. Потребность в решении поставленной задачи возникает в случае, если длительности отдельных работ являются случайными величинами. В этом случае временные характеристики завершения комплекса работ необходимы не только для оценки вероятностно-временных характеристик, но и для простейшего планирования времени начала каждой из работ. В настоящее время существуют подходы к решению данной задачи, наиболее распространенным из которых является PERT (Program Evaluation and Review Technique, техника оценки и анализа проектов). Однако оценки метода базируются на центральной предельной теореме, основывающейся на предположениях, которые в условиях реального функционирования производственных или обслуживающих систем невыполнимы. В силу этого возникает необходимость в получении модели, позволяющей оценить требуемые характеристики в любых условиях. В результате получена имитационная модель, позволяющая получить вероятностно-временные характеристики случайной величины, представляющей собой длительность комплекса последовательно-параллельных работ и отличающейся повышенной точностью по сравнению с существующими аналогами. Для реализации модели выбрана среда AnyLogic

Ключевые слова: имитационная модель, управление проектами, вычислительный эксперимент, вероятностно-временные характеристики, PERT

Введение

Особенностью современных сложных обслуживающих или производственных систем является случайный характер величины, описывающей длительность выполнения комплекса последовательно-параллельных работ. В связи с этим возникают сложности при оценке вероятностно-временных характеристик этой случайной величины. Важнейшей характеристикой является время выполнения комплекса всех работ, поскольку именно эта величина является основой для расчета времени начала каждой из работ. Кроме того, для исполнителя чрезвычайно важно знать такие характеристики, как дисперсия и закон распределения случайной величины, которая описывает данную длительность. Наличие закона (с точностью до параметров) позволит оценить риски несвоевременного завершения проекта, а также вероятность его завершения в заданный временной интервал. Существующие подходы не во всех случаях позволяют точно оценить указанные выше характеристики. В связи с этим возникает необходимость в разработке имитационной модели, позволяющей для любых проектов выполнить эксперимент, в результате которого

получить вероятностно-временные характеристики, отличающиеся повышенной точностью по сравнению с существующими аналогами.

Особенности задачи и обзор методов ее решения

Рассматривается задача оценки вероятностно-временных характеристик проекта, представляющего собой множество последовательно-параллельных работ. Задача решается в предположении, что каждая работа имеет длительность, которая является случайной величиной, распределенной по закону бета. Известны параметры каждой работы (наименьшее, наибольшее и наиболее вероятное время выполнения). Необходимо оценить вероятностно-временные характеристики случайной величины, описывающей длительность всего проекта. В частности, требуется:

- оценить числовые характеристики исследуемой случайной величины (математическое ожидание, дисперсия и т.д.);
- оценить закон распределения случайной величины, представляющей длительность проекта;
- оценить вероятность завершения проекта в заданном временном диапазоне.

Проанализируем существующие подходы к решению данной задачи.

Наиболее распространенным методом решения данной задачи является PERT [1-4]. Он основан на следующих предположениях:

- длительности всех работ распределены по закону бета с известными значениями наименьшего возможного времени выполнения a , наибольшего возможного времени выполнения b , а также наиболее вероятного времени выполнения (моды) m ;
- дисперсии работ определяются по формуле:

$$D\xi = \frac{(b-a)^2}{36}; \quad (1)$$

- позволяет определить ожидаемую длительность проекта по формуле:

$$M\eta = M\xi_1 + M\xi_2 + \dots + M\xi_k. \quad (2)$$

Дисперсия будет определяться формулой:

$$D\eta = D\xi_1 + D\xi_2 + \dots + D\xi_k. \quad (3)$$

Здесь $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ – случайные величины, описывающие длительности работ, стоящих на критическом пути.

Закон распределения случайной величины, описывающей длительность выполнения проекта, метод PERT предлагает аппроксимировать нормальным распределением с параметрами, определенными формулами (2) и (3). В основе данного предположения лежит центральная предельная теорема, утверждающая, что распределение суммы бесконечно большого числа одинаково распределенных случайных величин имеет нормальный закон.

Однако на практике для производственных и обслуживающих систем предположения центральной предельной теоремы не могут быть выполнены: количество работ, лежащих на критическом пути, как правило, невелико, а случайные величины, описывающие длительности самих работ, имеют разные параметры распределений. В связи с этим возникает необходимость в использовании других подходов к оценке вероятностно-временных характеристик проекта.

Структура имитационной модели

Рассмотрим процесс реализации имитационной модели, предназначенной для получения выборочных данных о длительности выполнения комплекса последовательно-параллельных работ с целью их дальнейшего анализа. Для реализации модели была выбрана среда AnyLogic. Основные ее преимущества для решения данной задачи описаны в [5].

В качестве исходных данных поступают:

- сведения о взаимной зависимости работ проекта;

- сведения о временных характеристиках длительности обслуживания каждой из работ.

На выходе каждого отдельного опыта необходимо получить длительность выполнения множества взаимно-зависимых работ.

В связи с этим, структура модели должна содержать следующие компоненты:

- объекты для имитации процесса выполнения работ;
- объекты для оценки временных параметров работ;
- компоненты для выгрузки выборки в файл Excel.

Рассмотрим данные компоненты подробнее. Поскольку проект включает в себя множество взаимно-зависимых работ, для его реализации необходимо смоделировать:

- собственно работы, которые выполняются случайное время, распределенное по закону бета;
- взаимную зависимость работ.

Для формирования взаимной зависимости, рассмотрим специфику графа, описывающего проект. Без ограничения общности его можно представить следующим образом (рис. 1).

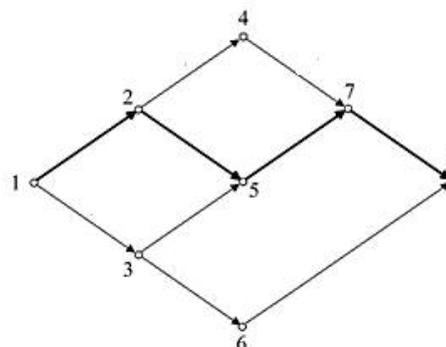


Рис. 1. Схематичное представление процесса выполнения множества последовательно-параллельных работ

Как видно из данного рисунка, работа задается двумя событиями, обозначающими начало и окончание ее выполнения. Одно и то же событие может быть началом или завершением нескольких работ. В связи с этим в модели используются объекты, позволяющие создавать копию заявок (SPLIT) и объединять несколько заявок в одну (ASSEMBLER).

Среда AnyLogic имеет богатую библиотеку встроенных функций, позволяющих смоделировать случайное число, распределенное по одному из многочисленных законов распределения. В частности, имеется функция beta, позволяющая сгенерировать случайную величину.

чину, имеющую бета-распределения в интервале от \min до \max с параметрами p и q . В связи с этим возникает задача определения параметров бета-распределения по значениям a , b , M и D (математического ожидания, дисперсии, а также минимального и максимального из возможных значений).

В [6] были получены соответствующие зависимости, позволяющие определить соответствующие значения параметров:

$$p = \frac{(b - M\xi) \cdot (M\xi - a)^2 - D\xi \cdot (M\xi - a)}{D\xi \cdot (b - a)} \quad (4)$$

и

$$q = \frac{(b - M\xi)^2 \cdot (M\xi - a) - D\xi \cdot (b - M\xi)}{D\xi \cdot (b - a)} \quad (5)$$

Для задания данных свойств воспользуемся элементами системной динамики. Для каждой работы зададим параметры a , b и M (наименьшее, наибольшее и ожидаемое время выполнения работы), определим дисперсию по формуле (1), объявив ее с помощью динамической переменной, а также найдем значения динамических переменных p и q , которые будут выступать в качестве параметров распределения бета. Настройка свойств для параметра p некоторой работы приведена ниже (рис. 2).

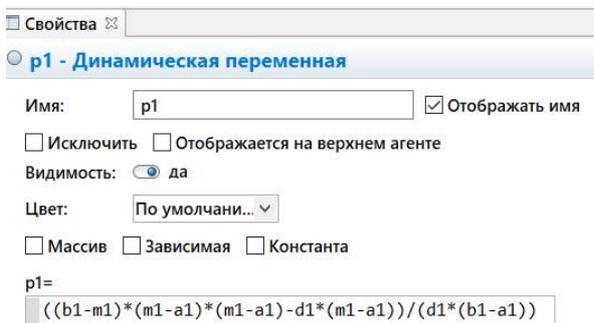


Рис. 2. Настройка свойства p

Важной составляющей имитационной модели является сбор статистики о времени выполнения проекта, структура которого была реализована средствами AnyLogic и выгрузка данных в Excel. Несмотря на то, что AnyLogic сам по себе является мощным средством для получения и обработки статистической информации, Excel на данный момент представляет более богатый инструментарий для решения соответствующих задач.

Для решения данной задачи будет использоваться объект AnyLogic ExcelFile, позволяющий осуществлять обмен данными с заданным файлом Excel, а после завершения очередного прогона модели подсчитаем время проекта и занесем его в текущую ячейку файла Excel. Пример выполнения данных действий представлен на рис. 3.

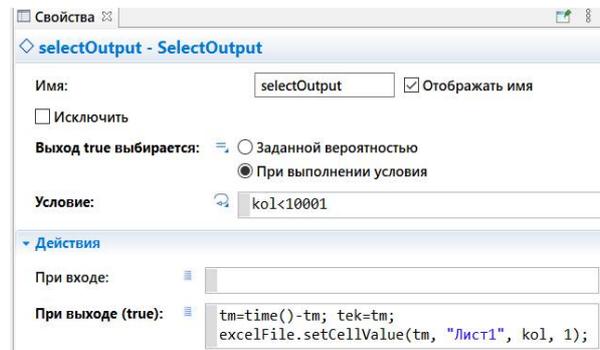


Рис. 3. Определение времени проекта и занесение его в файл Excel

Таким образом, общая структура проекта будет иметь вид, представленный на рис. 4.

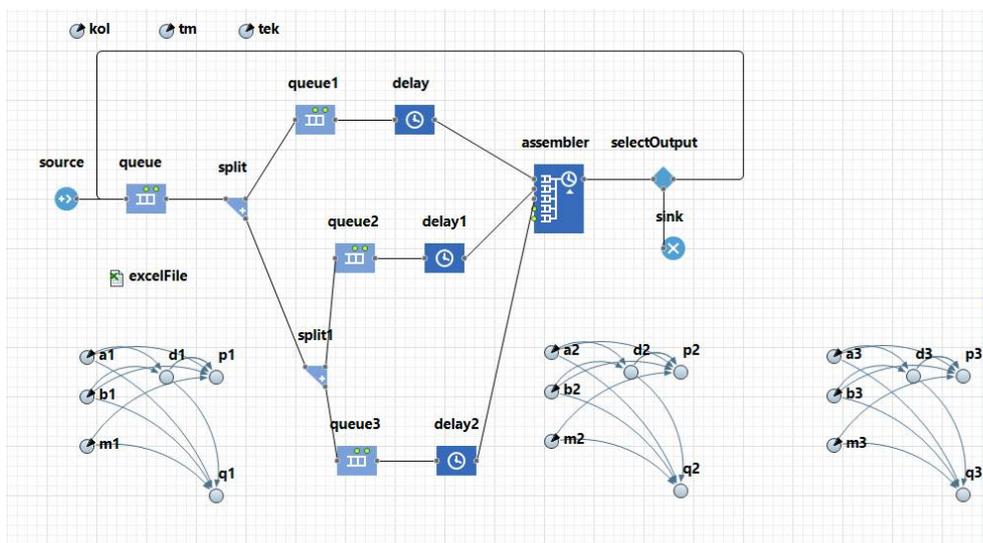


Рис. 4. Внешний вид проекта

В данном случае представлен проект, состоящий из трех параллельных работ.

Пример функционирования имитационной модели

Рассмотрим пример функционирования разработанной имитационной модели для анализа временных характеристик множества последовательно-параллельных работ. В частности, рассмотрим случай с одинаковыми параметрами времени выполнения работ. Зададим данные параметры следующим образом:

$$a_1=a_2=a_3=3;$$

$$b_1=b_2=b_3=7;$$

$$M_1=M_2=M_3=3$$

Как видно из рис. 3, собирается выборка размера 10000. Выгрузив данные в Excel с помощью надстройки «Анализ данных», найдем все необходимые числовые характеристики (рис. 5).

Проанализировав числовые характеристики, видим, что в данном случае длительность проекта немного превышает длительность выполнения работ, каждая из которых фактически представляет собой критический путь.

	A	B
1	Столбец1	
2		
3	Среднее	5,38145993
4	Стандартная оши	0,00550411
5	Медиана	5,39202369
6	Мода	#Н/Д
7	Стандартное откл	0,55041079
8	Дисперсия выбо	0,30295203
9	Эксцесс	-0,34780229
10	Асимметричност	-0,10816433
11	Интервал	3,42033256
12	Минимум	3,52802531
13	Максимум	6,94835787
14	Сумма	53814,5993
15	Счет	10000

Рис. 5. Описательная статистика

В целом, распределение симметрично (асимметричность равна -0.1) и немного плосковершинно относительно нормального распределения (эксцесс равен -0.35). Гистограмма выборки представлена на рис. 6.

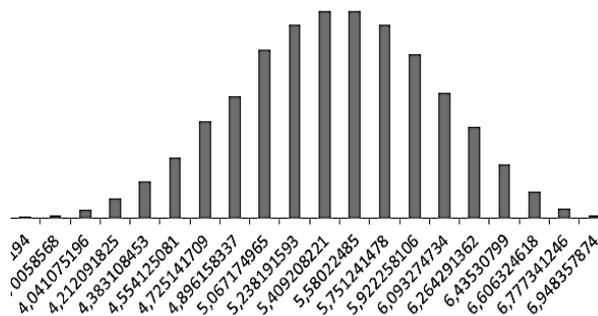


Рис. 6. Гистограмма выборки

В целом, распределение в данном примере близко к нормальному закону. Однако если в модели изменить одни лишь значения математического ожидания с 5 на 6, сделав случайные величины, описывающие длительности работ, асимметричными, то результат будет уже далек от нормального распределения (рис. 7).

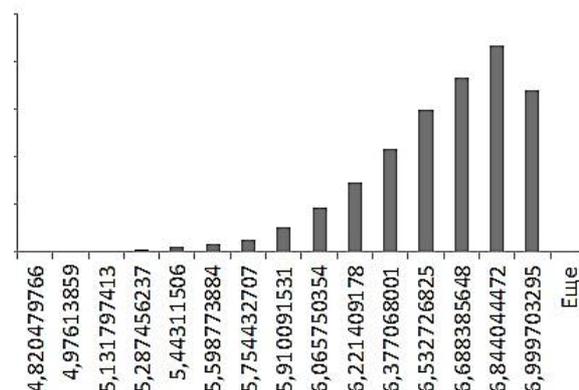


Рис. 7. Гистограмма выборки

Если анализировать описательную статистику, то можно сделать вывод, что полученное среднее значение уже будет существенно отличаться от длительностей отдельных работ, которые метод PERT предлагает взять в качестве оценки математического ожидания.

	А	В
1	<i>Столбец1</i>	
2		
3	Среднее	6,523535
4	Стандартная ошибка	0,00341
5	Медиана	6,592662
6	Мода	#Н/Д
7	Стандартное отклонение	0,340956
8	Дисперсия выборки	0,116251
9	Экссесс	1,433099
10	Асимметричность	-1,11549
11	Интервал	2,334882
12	Минимум	4,664821
13	Максимум	6,999703
14	Сумма	65235,35
15	Счет	10000

Рис. 8. Описательная статистика

Как видно из этого рисунка, у данной выборки существенно отклонились от 0 асимметрия и эксцесс, а также уменьшилась дисперсия.

Таким образом, разработана имитационная модель, предназначенная для оценки вероятностно-временных характеристик случайной величины, описывающей длительность проекта. Данная модель позволяет оценить необходимые характеристики с повышенной точностью по сравнению с существующими аналогами.

Выводы

Целью работы являлась разработка имитационной модели, позволяющей моделировать процесс выполнения множества последовательно-параллельных работ с целью получения вы-

борки о длительности выполнения проекта и дальнейшего анализа выборочных значений.

В результате были решены следующие задачи:

1. Проанализированы существующие подходы с целью получения вероятностно-временных характеристик проекта.

2. Спроектирована структура имитационной модели, позволяющей сформировать выборку, каждый элемент которой содержит длительность выполнения проекта, а также импортировать ее в файл Excel с целью дальнейшего анализа.

3. Рассмотрены примеры анализа вероятностно-временных характеристик для разных проектов. Кроме того, представлены результаты анализа выборочных значений, сделанные в Excel.

Литература

1. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами. М.: Синтег, 1997. 188 с.
2. Голенко-Гинзбург Д.И. Стохастические модели планирования и управления разработками: монография. Воронеж: Научная книга, 2011. 284 с.
3. Кофман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования и их применение. М.: Прогресс, 1968. 182с.
4. Project Management ToolBox:Tools and Technics for the practicing Project Manager, 2nd Edition. New Jersey: John Willey& Sons. 2016. 460 p.
5. Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 6 [Электронный ресурс] // AnyLogic.ru. URL: <https://www.anylogic.ru/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/>.
6. Олейникова С.А. Математические модели и методы оптимизации функционирования сложных обслуживающих систем со стохастическими параметрами: дисс. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2016. 354 с.

Поступила 06.03.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах

Олейникова Светлана Александровна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2313>

Селищев Иван Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: selishcheviv@gmail.com

SIMULATION MODEL FOR ANALYSING PROBABILITY-TIME CHARACTERISTICS OF THE DURATION OF A SET OF TASKS

S.A. Oleynikova, I.A. Selishchev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article is devoted to the development of a simulation model that allows you to estimate the probabilistic-time indicators of a random variable, which is the duration of the completion of the complex of sequential-parallel works. First of all, such indicators include: the law of the distribution of a random value (with an accuracy of parameters), the probability of completing the project in some time interval, as well as a mathematical expectation and dispersion. The need for solving the task arises in the case if the duration of individual works are random values. In this case, the time characteristics of the completion of the work complex are necessary not only to assess the probabilistic-time characteristics but also for the simplest planning of the start time of each work. Currently, there are approaches to solving this task, the most common of which is PERT (Program Evaluation and Review Technique, an evaluation and project analysis technique). However, the estimates of the method are based on the central limit theorem based on assumptions that are impracticable in the real functioning of industrial or serving systems. Because of this, it is necessary to obtain a model that allows one to estimate the required characteristics in any conditions. As a result, a simulation model was obtained, which allows one to obtain the probabilistic-time characteristics of a random variable, which is the duration of a complex of sequential-parallel works and characterized by increased accuracy compared to existing analogues. For the implementation of the model, we chose AnyLogic medium

Key words: simulation model, project management, computational experiment, probabilistic-time characteristics, PERT

References

1. Burkov V.N., Novikov D.A. "How to manage projects" ("Kak upravlyat' proektami"), Moscow, Sinteg Publisher, 1997, 188 p.
2. Golenko-Ginzburg D.I. "Stochastic models of planning and development management" ("Stokhasticheskie modeli planirovaniya i upravleniya razrabotkami"), monograph, Voronezh, Nauchnaya kniga, 2001, 284 p.
3. Koffman A. Debazey G. "Network planning methods and its applications" ("Setevye metody planirovaniya i ikh primeneniye"), Moscow, Progress, 1968, 182 p.
4. "Project Management ToolBox: Tools and Technics for the practicing Project Manager", New Jersey, John Willey& Sons, 2016, 460 p.
5. Borshchev A. "The big book of simulation modeling. multimethod modeling with AnyLogic", available at: <https://www.anylogic.ru/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/>.
6. Oleynikova S.A. "Mathematical models and methods for optimizing the functioning of complex service systems with stochastic parameters" ("Matematicheskie modeli i metody optimizatsii funktsionirovaniya slozhnykh obsluzhivaushchikh system so stokhasticheskimi parametrami"), Dr. Tech. Sci. diss., Voronezh, 2016, 354 p.

Submitted 06.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Svetlana A. Oleynikova, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com

Ivan A. Selichshev, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: selishcheviv@gmail.com

ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ И ПРИБОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БЕССВИНЦОВЫХ ПРИПОЕВ**Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, О.Ю. Макаров, А.А. Пирогов, А.С. Демихова****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: обеспечение надежности и качества радиоэлектронных средств и приборов - это одна из главных задач в процессе проектирования новых устройств. Благодаря высокому качеству паяных соединений увеличивается срок службы электронных изделий, а также их безотказность в процессе эксплуатации и ремонтпригодность. Также нужно не забывать об экологической безопасности производимых устройств. В связи со всем вышеизложенным наиболее перспективно проводить исследования и искать практические решения возникающих трудностей в сфере технологий, в которых используются бессвинцовые припои, что позволит соблюсти современные требования к электронной аппаратуре. Кратко изложены основные последствия и проблемы применения чисто бессвинцовой пайки, рассмотрены проблемы применения смешанной технологии пайки и исследование эффекта роста оловянных «усов». Сделан вывод о том, что избежать большинства дефектов помогает применение активных флюсов, сохраняющих свои свойства при высоких температурах, пасту необходимо выбирать с тем условием, что в ее составе не должно быть канифоли, которая начинает активно выделяться в виде газа при повышении температуры, следует также верно подбирать температурный профиль пайки. Среди финишных покрытий лучше всего себя зарекомендовали иммерсионное серебро и никель-золото. Применение в припое в качестве заменителей свинца таких металлов, как висмут и индий существенно повышает стоимость припоев. Отмечается, что хорошие показатели имеют припои с содержанием цинка, однако цинк приводит к невозможности долгосрочного хранения паяльных паст, повышению оксидирования, необходимости пайки в среде инертных газов и с применением активных флюсов

Ключевые слова: бессвинцовая пайка, смешанная пайка, директива по экологической безопасности RoHS, дефекты пайки, образование перемычек, шариков, плохая смачиваемость, появление пустот, эффект «надгробия», образование оловянных «усов»

Введение

Принятая в 2006 году директива RoHS, которая ограничивает использование признанных вредными элементов в промышленной и потребительской электронике, один из которых – это свинец, создала немало трудностей предприятиям, осуществляющих пайку печатных плат и производство корпусных электронных компонентов.

Разделение бессвинцовых припоев на температурные группы и их основные особенности

В настоящее время большинство производителей электроники заботятся о сохранности окружающей среды или вынуждены считаться с положениями директивы RoHS, поэтому они стремятся усовершенствовать и внедрить у себя современную, перспективную и безопасную технологию пайки бессвинцо-

выми припоями. Но есть ряд препятствий, затрудняющих повсеместное и широкое применение данных припоев.

При выборе припоя принимают во внимание следующее: структуру печатной платы, параметры прибора, свойства устройства изделия, сферу его применения. И далеко не всегда свойства бессвинцовых паяных соединений соответствуют требованиям, предъявляемых к устройству, особенно остро это проявляется в военной и космической сферах, где из-за повышенных требований к надежности и экстремальных условий эксплуатации свинцосодержащие припои до сих пор широко используются.

Также один из главных критериев при выборе припоя – это температура его плавления. Это сказывается на используемом оборудовании и применяемой элементной базе. Как правило, бессвинцовые припои со свойствами аналогичными свинцовосодержащим имеют более высокую температуру пайки, а те, которые применяются при тех же температурах, обладают худшими электрическими и механическими свойствами [1, 2].

Бессвинцовые припои условно делятся на: низкотемпературные (температура плавления ≥ 180 °C); легкоплавкие (температура плавления 180 – 200 °C); среднетемпературные (температура плавления 180 – 200 °C); высокотемпературные (температура плавления 180 – 200 °C).

Разумеется, что припои первой группы не способны обеспечить достаточную надежность паяных соединений в условиях высокой температуры использования устройств, также при термоциклировании ухудшаются их прочностные свойства. Чаще всего их используют при создании устройств, которые не подвергаются воздействиям высоких температур при эксплуатации, а следовательно, в них не требуется установка устойчивых к высоким температурам элементов, поэтому и применяют припои первой группы. Также не стоит забывать о том, что припои, в состав которых входит индий, имеют склонность к активной коррозии, если изделие будет эксплуатироваться при повышенной влажности, но в целом они довольно устойчивы к окислению. Еще при выборе температурного профиля пайки нужно принимать во внимание, что несмотря на то, что припои с индием имеют низкую температуру пайки, они в то же время склонны создавать холодносварочные соединения при ошибочном подборе температур.

Припои этой группы, содержащие висмут, способны создавать соединения, превосходящие по большинству свойств, среди которых и прочностные, традиционные свинецсодержащие припои Sn/Pb, но при этом в процессе должен присутствовать свинец, например на выводах элементов, а плата должна быть покрыта органическим финишным покрытием, что в свою очередь создает дополнительные трудности, так как эти сами покрытия склонны к деградации под воздействием высоких температур и они не имеют широкого распространения, да и, если говорить о бессвинцовых технологиях, то он должен отсутствовать вообще, даже на выводах компонентов. Стоит также отметить, что использование в качестве заменителей висмута и индия существенно повышает стоимость припоев [3].

У второй группы припоев температура плавления близка к традиционным свинцово-содержащим припоям. Но присутствие индия и висмута в их составе приводит к тем же последствиям, о которых говорилось выше, хотя и не так сильно выражено из-за более низкого процентного содержания этих элементов в со-

ставе припоев. А присутствие цинка приводит к трудностям из-за его довольно высокой химической активности: невозможность долгосрочного хранения паяльных паст, повышенное окислирование, необходимость пайки в среде инертных газов и с применением активных флюсов.

У третьей группы припоев температура плавления выше, чем у свинецсодержащих. Сплавы олова с медью имеют усталостные показатели, превосходящие даже свинецсодержащие припои, однако они обладают значительно худшей смачиваемостью и недостаточной прочностью в сравнении с традиционными сплавами Sn/Pb.

У припоев, состоящих из олова и серебра, смачиваемость и прочностные показатели выше, чем у сплавов с медью, также и при термоциклировании показывают свойства лучше, чем медьсодержащие. Несмотря на ряд преимуществ, они также не лишены недостатков. Так, например, при воздействии высоких температур паяные соединения могут повреждаться. Помимо этого, даже обладая хорошей стабильностью и образованием хороших соединений, связанных с конечной растворимостью серебра в олове, сплав в местах пайки способен вызывать повышенную скорость диффузии меди в олово с образованием интерметаллидов. Для борьбы с этим эффектом приходится дополнительно покрывать поверхность печатной платы слоем никеля, либо иммерсионным золотом, из чего следует удорожание платы, да и сам припой имеет более высокую стоимость в сравнении со свинецсодержащими припоями [3, 4, 5].

Доработанным вариантом сплава олова и серебра является трехкомпонентный припой, включающий в себя медь Sn/Ag/Cu. И хотя ни один сплав, основанный на олове с включением в разных пропорциях серебра, висмута, меди и сурьмы, не способен в полной мере заменить традиционные свинецсодержащие припои, данный трехкомпонентный сплав на сегодняшний день признан лучшим эквивалентом для замены припоя Sn/Pb. Но несмотря на все плюсы и схожесть по свойствам этого припоя с свинецсодержащими, данный сплав имеет более высокую температуру плавления, а из-за его плохой смачиваемости приходится работать с ним при еще более высоких температурах, что приводит к значительным изменениям режима пайки и, как следствие, всего технологического процесса в целом, а также влияет на выбор элементной базы и материалов.

При добавлении в сплав олова и серебра висмута получается припой, который является лидером среди всех бессвинцовых припоев по паяемости. Также он имеет более низкую температуру плавления в сравнении с чистым оловосеребряным сплавом и обеспечивает более надежную спайку. Недостаток смачиваемости данного припоя можно решить добавлением в него германия или меди. Но среди всех положительных сторон данного сплава есть и значительная отрицательная, он в сравнении с остальными бессвинцовыми припоями склонен создавать припойные перемычки, что без сомнения является существенным минусом, особенно при пайке компонентов с малым шагом между вводами или очень близко расположенных друг к другу. Данный недостаток частично можно ликвидировать добавлением в сплав дополнительных элементов.

Припои четвертой группы обладают очень высокой температурой плавления и их применение возможно только с очень термостойкими элементами и материалами. Сплав золота с оловом чрезвычайно дорогой и в основном используется для пайки при изготовлении в специализированных отраслях таких, как военная и космическая. Он хорошо подходит для пайки золота с золотом.

Однако и этот припой наряду с многочисленными плюсами (сохранение свойств при длительном воздействии повышенных и высоких температур, устойчивость даже к ста процентной влажности, поддержание пайки без использования флюсов, что благотворно сказывается на коррозионной стойкости соединений, избежание появления токов утечки) имеет и существенные минусы: возможность появления пустот в соединениях, образование хрупких интерметаллидов в местах пайки. Поэтому следует очень тщательно подбирать технологический процесс пайки с учетом свойств припоя и компонентов.

Основные дефекты при пайке бессвинцовыми припоями

Существует шесть основных часто встречающихся дефектов пайки бессвинцовыми припоями: образование перемычек, шариков, плохая смачиваемость, появление пустот, эффект «надгробия», образование оловянных «усов».

Перемычки образуются при неправильном подборе режима пайки.

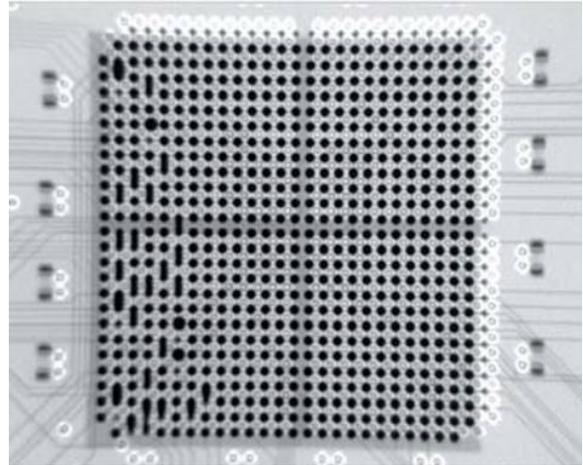


Рис. 1. Перемычки между контактами

Этот дефект оказывает сильное влияние на качество пайки при использовании элементов с малым шагом между выводами. Для избежание этого нужно применять паяльные пасты с наименьшей осадкой.

Шарики припоя могут возникать рядом с выводами компонентов, рядом (между) контактными площадками, вдоль корпусов компонентов и в целом на всей поверхности платы.

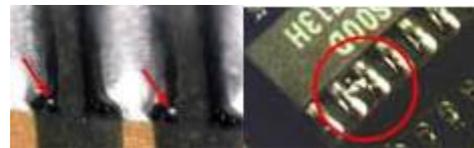


Рис. 2. Шарики рядом с выводами – слева, между контактными площадками – справа

В основном возникают по тем же причинам, что и перемычки, и пути устранения данного дефекта схожи.

Плохая смачиваемость выводов и площадок обычно обусловлена тем, что неправильно подобран флюс или финишное покрытие поверхности платы.

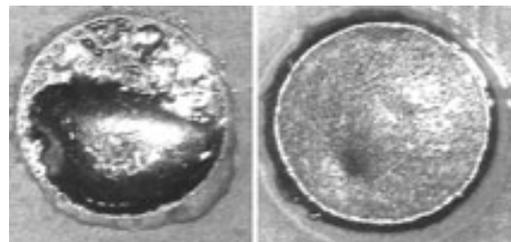


Рис. 3. Плохая смачиваемость – слева, приемлемая – справа

Помогает решить эту проблему финишные покрытия с использованием иммерсион-

ного серебра или никель-золота. Также можно применять водосмываемые флюсы с достаточным содержанием активаторов и галоидов [6].

Возникающие при пайке пустоты могут приводить к выходу из строя аппаратуры. Особенно часто это случается уже при эксплуатации изделия при больших перепадах температур, вибрационных нагрузках и изгибах. Чаще всего причинами этого дефекта являются выделяющиеся газы флюсов при пайке, окисленные контакты и площадки, повышенное поверхностное натяжение припоев, покрытия поверхности платы.

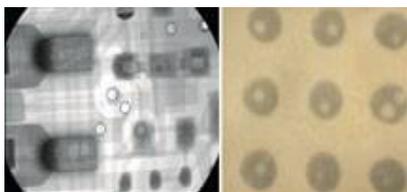


Рис. 4. Появление пустот в паяных соединениях

Избежать данные дефекты помогает применение активных флюсов, сохраняющие свои свойства при высоких температурах, пасту следует выбирать с тем условием, что в ее составе не должно быть канифоли, которая начинает активно выделяться в виде газа при повышении температуры, следует также верно подбирать температурный профиль пайки. Среди финишных покрытий лучше всего себя зарекомендовали иммерсионное серебро и никель-золото.

Эффект надгробия возникает при пайке малых по размеру элементов. Он представляет собой отрыв одного из выводов компонента над контактной площадкой. К этому приводит более низкая смачиваемость бессвинцовых припоев по сравнению с традиционными свинецсодержащими припоями, и они не обладают таким выраженным эффектом выравнивания.



Рис. 5. Эффект надгробия

Избежать данный дефект помогает максимально точное позиционирование компо-

нентов и подбор правильного температурного профиля пайки.

Эффект роста оловянных усов особенно характерен для бессвинцовых припоев из-за высокого содержания в их составе олова. Возникновение этих монокристаллических структур чаще всего связано с видами покрытия, условиями хранения, наличием примесей и слоя осаждения.

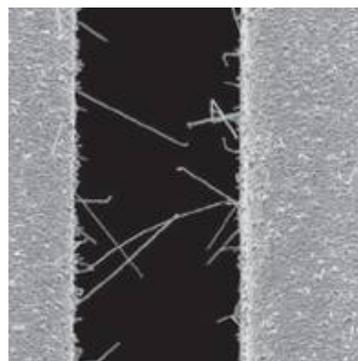


Рис. 6. Монокристаллические структуры, называемые оловянными усам

Их росту препятствуют золото и индий. Но такие добавки соответственно повышают стоимость припоя, а также не лишены своих недостатков.

Заключение

На сегодняшний день есть ряд трудностей, связанных с применением технологий пайки бессвинцовыми припоями, которые приводят к понижению качества и надежности электронной аппаратуры, повышению ее стоимости и падению дохода производств. Применение в припое в качестве заменителей свинца таких металлов, как висмут и индий, существенно повышает стоимость припоев. Также в статье отмечается, что хорошие показатели имеют припои с содержанием цинка, однако цинк приводит к невозможности долгосрочного хранения паяльных паст, повышенному окислению, необходимости пайки в среде инертных газов и с применением активных флюсов. Бессвинцовые припои имеют шесть распространенных дефектов, которые возникают при пайке: образование перемычек, шариков, плохая смачиваемость, появление пустот, эффект «надгробия», образование оловянных «усов».

Однако технологии пайки не стоят на месте, надежность и качество электронных средств и приборов, созданных с применением

бессвинцовых паяльных паст и припоев, неуклонно растёт.

Литература

1. Шапиро Л. Новые европейские директивы для изделий электроники // Производство электроники. 2006. № 2.
2. The evolution of microstructure and microhardness of Sn-Ag and Sn-Cu solders during high temperature aging / S.K. Seo, S.K. Kang, D.Y. Shih, et al. // *Microelectron Reliab.* 2009. № 49(3). P. 288–295.
3. Evaluation of computational complexity and shortcomings of non-binary low density decoding algorithms. *Journal of Physics* / V.V. Glotov, A.V. Bashkirov, N.V. Astakhov, A.A. Pirogov, S.N. Panychev // *Conference Series*

The proceedings International Conference "Information Technologies in Business and Industry". 2019. P. 022004.

4. Анализ структуры, декодирования и оптимизации гибридных недвоичных LDPC-кодов / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, А.В. Муратов, В.М. Питолин, М.В. Хоршайлова // *Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума.* 2017. Т. 1. С. 355-359.

5. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, О.Е. Журилова, О.Ю. Макаров // *Радиотехника.* 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 109-112.

6. Методика проектирования синтезатора частот прямого цифрового синтеза на базе ПЛИС / А.А. Пирогов, Е.А. Бочаров, Э.В. Сёмка, О.Ю. Макаров // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* 2018. Т. 14. № 6. С. 108-116.

Поступила 04.03.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах:

Астахов Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летие Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, тел. +7-903-856-88-01

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летие Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, тел. +7-952-543-99-88

Макаров Олег Юрьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летие Октября, 84), e-mail: moy230@yandex.ru, тел. +7-910-348-70-32

Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летие Октября, 84), тел. +7-904-214-56-29

Демикова Алеся Сергеевна – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летие Октября, 84), тел. +7-920-428-05-15

PROBLEMS OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF RADIO ELECTRONIC PRODUCTS AND INSTRUMENTS WHEN USING LEAD-FREE SOLDERS

N.V. Astakhov, A.V. Bashkirov, O.Yu. Makarov, A.A. Pirogov, A.S. Demikhova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: ensuring the reliability and quality of radio-electronic equipment and devices is one of the main problems in the process of designing new devices. Due to the high quality of soldered joints, the service life of electronic products increases, as well as their reliability during operation and maintainability. It is also necessary not to forget about the environmental safety of the manufactured devices. In connection with all the above, it is most promising to conduct research and look for practical solutions to the emerging difficulties in the field of technologies that use lead-free solders, which will allow us to meet modern requirements for electronic equipment. The article briefly describes the main consequences and problems of using pure lead-free soldering, the problems of using mixed soldering technology, and the study of the effect "whiskers". Use of active fluxes that retain their properties at high temperatures helps to avoid most defects, the paste should be chosen with the condition that it should not contain rosin, which begins to actively emit as a gas when the temperature rises, and the temperature profile of soldering should also be correctly selected. Among the finishing coatings, immersion silver and nickel-gold proved to be the best. The use of metals such as bismuth and indium in solder, as lead substitutes, significantly increases the cost of solders. The article also notes that solders with a zinc content have good indicators but zinc leads to the impossibility of long-term storage of soldering pastes, increased oxidation, the need for soldering in an environment of inert gases and with the use of active fluxes

Key words: lead-free soldering, mixed soldering, RoHS environmental safety directive, soldering defects, formation of jumpers, beads, poor wettability, voids, "tombstone" effect, formation of tin "whiskers"

References

1. Shapiro L. "New european directives for electronics", *Electronics Production (Proizvodstvo elektroniki)*, 2006, no. 2.
2. Seo S.K., Kang S.K., Shih D.Y. et al. "The evolution of microstructure and microhardness of Sn-Ag and Sn-Cu solders during high temperature aging", *Microelectron Reliab.*, 2009, no. 49 (3), pp. 288–295.
3. Glotov V.V., Bashkirov A.V., Astakhov N.V., Pirogov A.A., Panychev S.N. "Evaluation of computational complexity and shortcomings of non-binary low density decoding algorithms", *Journal of Physics: Conference Series The proceedings International Conference "Information Technologies in Business and Industry"*, 2019, pp. 022004.
4. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Muratov A.V., Pitolin V.M., Khoroshailova M.V. "Analysis of the structure, decoding and optimization of hybrid non-binary LDPC codes", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, 2017, vol. 1, pp. 355-359.
5. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.E., Makarov O.Yu. "Frequency-time analysis of non-stationary signals by wavelet transform and window Fourier transform", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 109-112.
6. Pirogov A.A., Bocharov E.A., Semka E.V., Makarov O.Yu. "FPGA-based frequency synthesis synthesizer design technique", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 6, pp. 108-116.

Submitted 04.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Nikolay V. Astakhov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kokakoller@gmail.com
Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru
Oleg Yu. Makarov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: moy230@yandex.ru
Aleksandr A. Pirogov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com
Alesya S. Demikhova, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kibr@vorstu.ru

АНТЕННАЯ СИСТЕМА С КОММУТАЦИОННЫМ СКАНИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОЙ ЛИНЗЫ ЛЮНЕБЕРГА С КОНЦЕНТРИЧЕСКИМИ КОЛЬЦАМИА.В. Ашихмин¹, Ю.Г. Пастернак^{1,2}, В.А. Пендюрин³, Ф.С. Сафонов²¹ЗАО "ИРКОС", г. Москва, Россия²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия³АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия

Аннотация: антенные системы с возможностью широкоугольного сканирования довольно часто используются в современных системах беспроводной связи и радиолокационных системах гражданского и военного назначения. Особое внимание привлекли Smart-антенны (антенны с коммутируемым лучом и адаптивные антенные системы), а также фазированные антенные решетки (ФАР). В работе рассмотрен вариант построения ФАР с коммутационным сканированием с диаграммообразующей схемой в виде плоской линзы Люнеберга, состоящей из системы концентрических диэлектрических колец, размещенных на подложке из материала Rogers 5880. Исследованы влияние кронштейна крепления для ФАР на диаграмму направленности, уровень излучения, снижение коэффициента направленного действия и уровня сектора сканирования в азимутальной плоскости. Максимальный диаметр ФАР 160 мм, полная высота такой антенны получилась 38 мм. Запитка осуществляется при помощи коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом. Диаметр самой линзы Люнеберга был выбран 80 мм; полная высота линзы $H = 0.939$ мм. Подложка имеет толщину $t = 0.127$ мм, склеенная слоем клея толщиной 0.025 мм. Концентрические кольца на этой подложке имеют высоту 0.787 мм. Минимальная ширина концентрического кольца (внешнего) $d - W = 0.25$ мм (при резке УФ лазером минимальная ширина перегородки между отверстиями равна 0.05 мм). Плосковые трансформаторы расположены на плате из материала Rogers 5880 и имеют толщину равную $H = 0.939$ мм

Ключевые слова: математическая модель, линза Люнеберга, ТЕМ-рупор, диаграмма направленности, кронштейн для ФА

Введение

Антенные системы с возможностью широкоугольного сканирования довольно часто используются в современных системах беспроводной связи и радиолокационных системах гражданского и военного назначения. Особое внимание привлекли Smart-антенны (антенны с коммутируемым лучом и адаптивные антенные системы), а также фазированные антенные решетки (ФАР). Особенностью данных антенн является конструкция, представляющая собой совокупность дискретных элементов, когерентных по отношению к другим элементам принимающим или передающим электромагнитные сигналы. Сканирование осуществляется при помощи изменения комплексной амплитуды и поляризации волн, излучаемых элементами антенной решетки (АР), или при помощи фазового метода управления диаграммой направленности. Одним из примеров является антенная система, где обе сферические тефлоновые линзы, запитываются при помощи 23-элементной конической щелевой антенной решеткой [1] и

11-элементной антенной решеткой Яги-Уда [2]. Такая система может покрывать до 90° в азимутальной плоскости. В работе [3] показана 21-элементная АР с пересечением луча -3дБ и возможностью сканирования до 90° , при этом уровень падения усиления менее -3дБ. Особенностью данной антенной системы является ее конструкция, которая состоит из двух, заполненных воздухом, параллельных пластин, расстояние между которыми изменяется в зависимости от радиуса. Такой подход был выбран для имитации закона Люнеберга. Кроме того, в работе [4] представлена шестислойная цилиндрическая линза Люнеберга, возбуждаемая при помощи 17-элементной плоской логарифмической периодической дипольной решетки, которая может сканировать сектор 85° на частоте 79 ГГц.

ФАР является одним из основных инструментов для широкоугольного сканирования. Для этого необходимо достичь согласования активного импеданса с широким углом обзора. В работе [5] показана линейная микрополосковая фазированная решетка, размером 1×16 элементов, имеющая возможность сканирования до 66° . В работе [6] представлена широкополосная антенная решетка из сильно связанных диполей со встроенным симметрирующим устройством,

и новую систему, состоящую из печатной частотно-избирательной поверхности. Такая антенная решетка позволяет сканировать сектор 75° и 60° в плоскостях E и H соответственно.

Как уже отмечалось, основным преимуществом линзовой антенны с коммутируемыми лучами по сравнению с ФАР является более широкий охват сканирования, а также более низкая стоимость, но у таких антенн есть свои недостатки. Во-первых, из-за больших габаритных размеров, массы линзовой антенны и изогнутой фокусной дуги страдает система интеграции. Во-вторых, количество переключаемых пучков, необходимых для заполнения сектора сканирования, эквивалентно числу излучающих элементов, что указывает на то, что плотное расположение излучающих элементов неизбежно для систем сканирования с высоким коэффициентом усиления. В-третьих, концентрированное распределение энергии по фокальной области вызывает некоторые нежелательные проблемы на уровне подсистемы радиочастоты, например, в режиме передачи, ограниченную эффективную изотропную излучаемую мощность. Для преодоления этих трудностей перспективным решением является сочетание управляемого распределения поля ФАР и присутствия линзы многолучевых возможностей.

В работах [7-9] по использованию ФАР в качестве питающих антенн показаны ФАР, использующиеся для компенсации поверхностных искажений и улучшения характеристик сканирования больших параболических отражателей. В работе [9] показана мелкомасштабная подача массива.

В настоящей работе рассмотрен вариант построения ФАР с коммутационным сканированием (рис. 1) с диаграммообразующей схемой в виде плоской линзы Люнеберга, состоящей из системы концентрических диэлектрических колец, размещенных на подложке из материала Rogers 5880, рис. 1, г. Исследовано влияние кронштейна крепления для ФАР на наличие его воздействия на диаграмму направленности, уровень излучения, снижение коэффициента направленного действия и уровень сектора сканирования в азимутальной плоскости.

Конструкция ФАР с линзой Люнеберга с концентрическими кольцами

Максимальный диаметр ФАР 160 мм, полная высота такой антенны получилась 38 мм. Запитка осуществляется при помощи коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом. Диаметр самой линзы Люнеберга был вы-

бран 80 мм; полная высота линзы $H = 0.939$ мм. Подложка имеет толщину $t = 0.127$ мм, склеенная слоем клея, толщиной 0.025 мм. Концентрические кольца на этой подложке имеют высоту 0.787 мм. Минимальная ширина концентрического кольца (внешнего) $d - W = 0.25$ мм (при резке УФ лазером минимальная ширина перегородки между отверстиями равна 0.05 мм). Полосковые трансформаторы расположены на плате из материала Rogers 5880 и имеют толщину равную $H = 0.939$ мм.

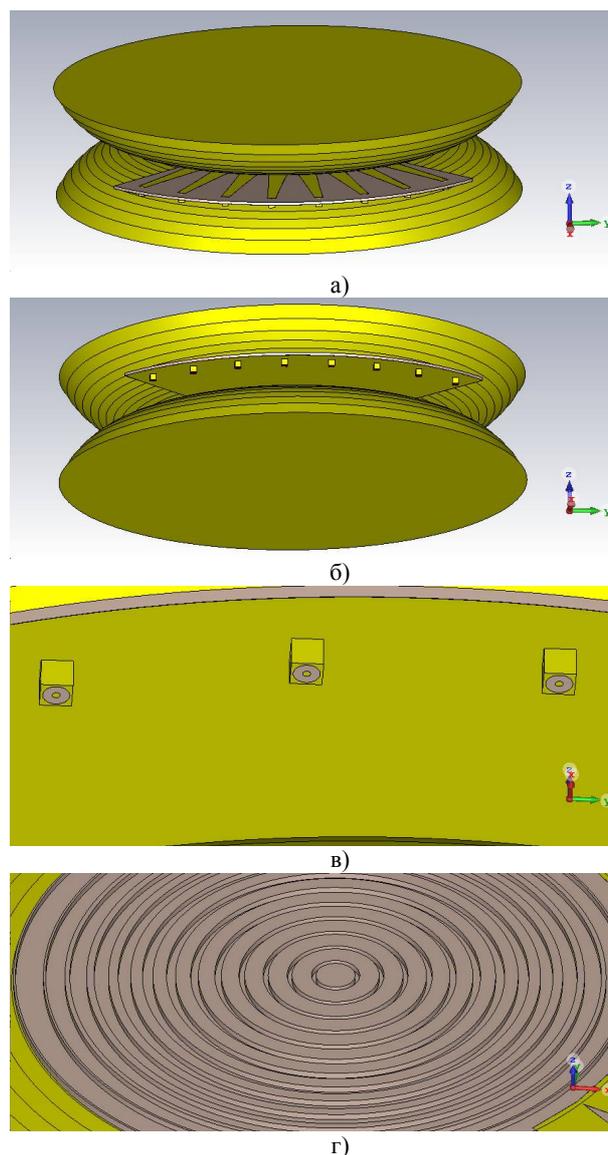


Рис. 1. Конструкция ФАР с линзой Люнеберга с концентрическими кольцами:

- а) общий вид ФАР
- б) запитка от коаксиальных кабелей
- в) коаксиальная запитка полосков
- г) концентрические кольца на теле линзы Люнеберга
- д) линза Люнеберга и полосковые трансформаторы на плате
- е) линза Люнеберга с обратной стороны

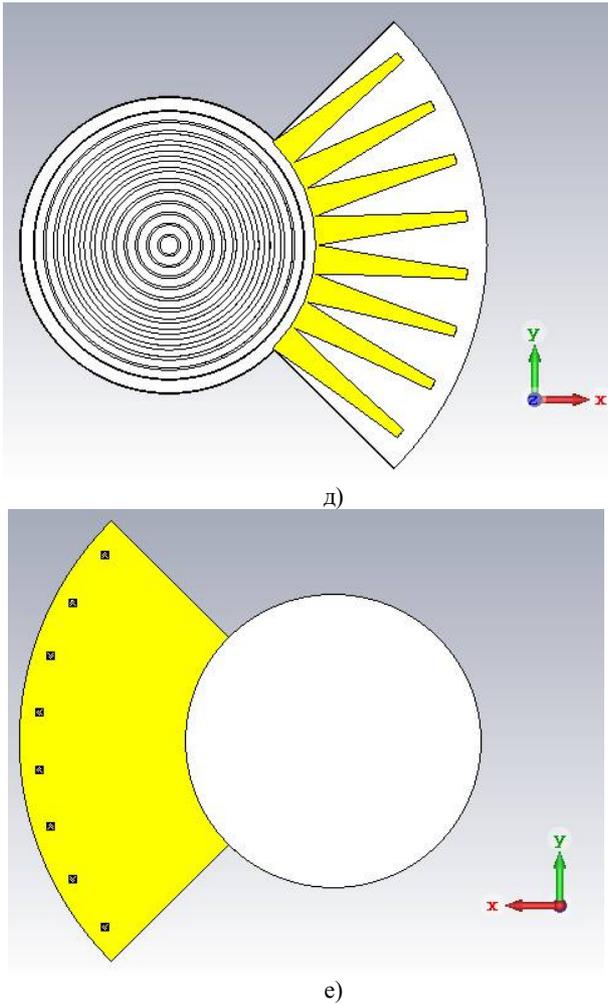


Рис. 1. Конструкция ФАР с линзой Лüneберга с концентрическими кольцами:

- а) общий вид ФАР
- б) запитка от коаксиальных кабелей
- в) коаксиальная запитка полосков
- г) концентрические кольца на теле линзы Лüneберга
- д) линза Лüneберга и полосковые трансформаторы на плате
- е) линза Лüneберга с обратной стороны (продолжение)

На рис. 2 показана модель замедляющей структуры в виде периодической диэлектрической решетки типа «гребенка», расположенной внутри плоского металлического волновода. Период решетки d выбирается, по крайней мере, в 3 раза меньше минимальной длины волны в замедляющей структуре, ограниченной при $y = 0$ и $y = H$ металлическими стенками. Параметром вариации является ширина воздушных зазоров w .

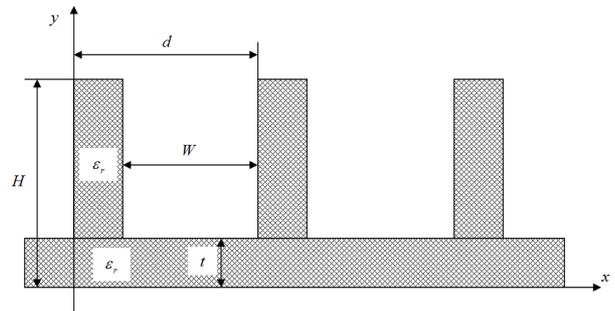


Рис. 2. Замедляющая структура линзы Лüneберга

Требуемая ширина паза определяется в соответствии с выражением

$$W = \frac{d \cdot (H - t) / H}{\left(\frac{1}{\epsilon_{эфф}} - \frac{t}{H \cdot \epsilon_r} \right) \cdot (1 - \epsilon_r)} - \frac{d \cdot \epsilon_r}{(1 - \epsilon_r)}, \quad (1)$$

где

$$\epsilon_{эфф}(r) = 2 - \left(\frac{r}{R_0} \right)^2;$$

R_0 - радиус линзы Лüneберга.

На рис. 3 приведены зависимости требуемой E_i и реализованной эффективной диэлектрической проницаемости E_{eff} от текущей радиальной координаты r , с учетом конечной толщины подложки $t = 0.127$ мм и минимальной ширины внешнего концентрического кольца $d - W = 0.25$ мм.

Отметим, что для уменьшения фазовых искажений, приводящих к искажениям диаграммы направленности (повышению уровня боковых лепестков), можно реализовать плоскую линзу Лüneберга с оболочкой.

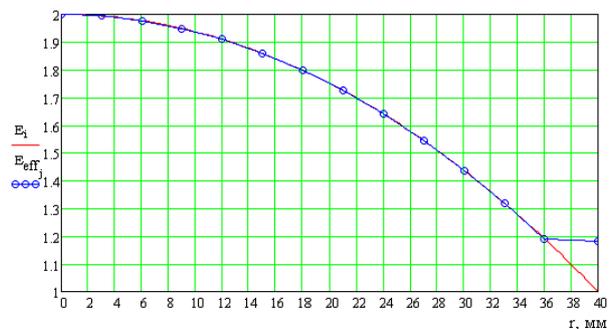


Рис. 3. Идеальное распределение диэлектрической проницаемости по радиусу (красная линия); синяя линия с кружками – реализованная эффективная проницаемость с учетом технологических ограничений

Результаты математического моделирования

На рис. 4 приведены частотные зависимости потерь мощности в материалах антенного устройства, не превышающие 0.4 дБ во всем исследуемом диапазоне частот 8-18 ГГц, и суммарного коэффициента полезного действия, вычисляемого с учетом потерь в балластных портах и рассогласования входов антенны, растущего при увеличении значения частоты. Минимальное значение суммарного КПД антенного устройства на нижней рабочей частоте 8 ГГц составляет около 50%.

Частотные зависимости коэффициента стоячей волны на входах антенного устройства показаны на рис. 5.

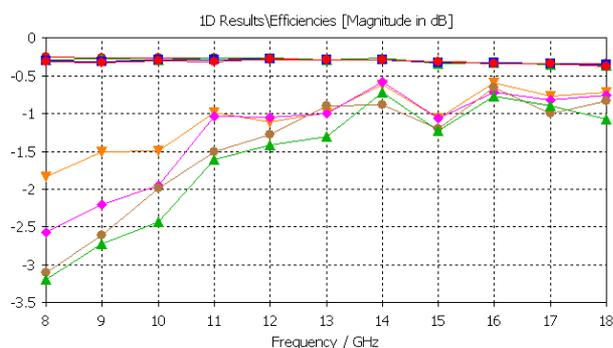


Рис. 4. Потери в материалах, дБ (верхние кривые) и суммарный КПД (нижние кривые) с учетом потерь в балластных портах и рассогласования

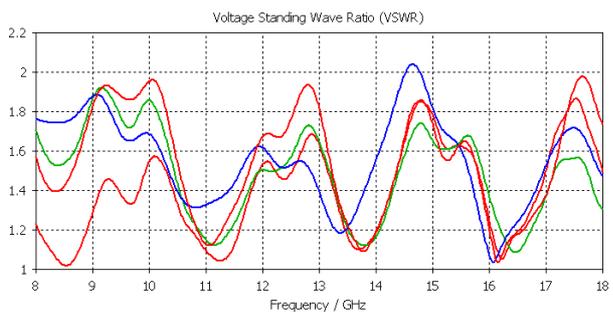


Рис. 5. КСВН при запитке 1-4 портов

На рис. 6 приведены диаграммы направленности в азимутальной плоскости для входов 1-4 антенного устройства на частотах от 8 до 18 ГГц.

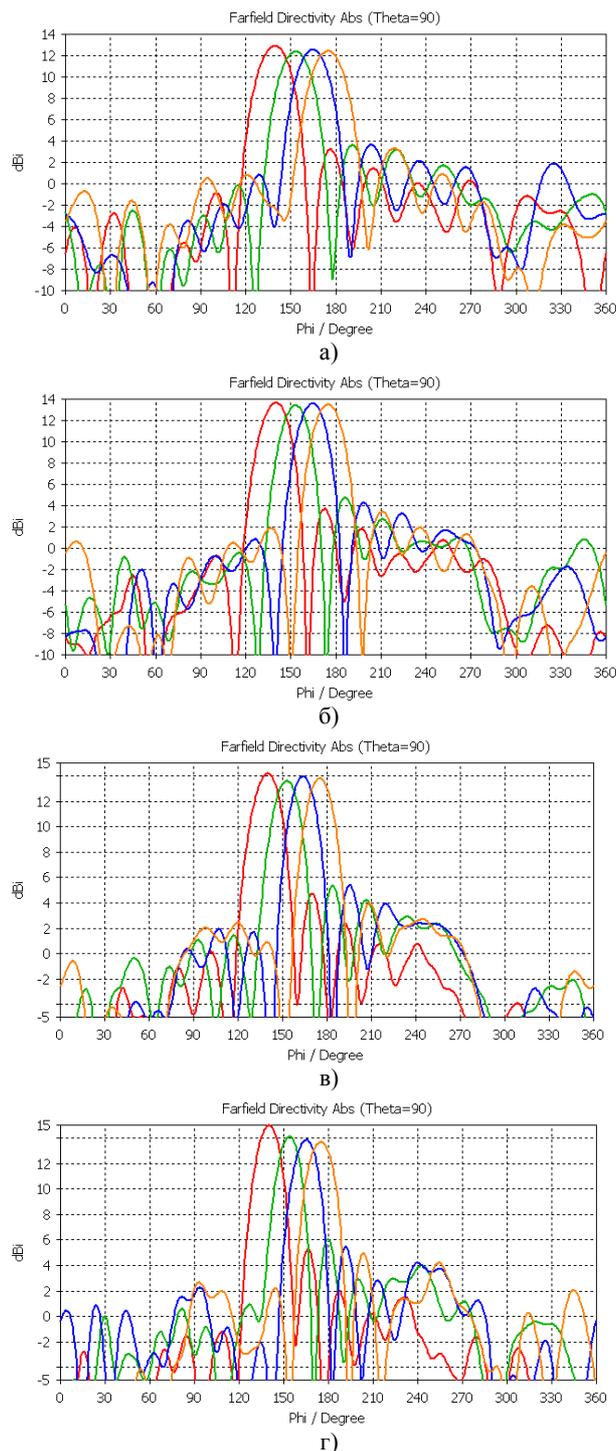


Рис. 6. ДН ФАР при запитке 1-4 портов в азимутальной плоскости, дБ для следующих частот: а) $f=8$ ГГц; б) $f=9$ ГГц; в) $f=10$ ГГц; г) $f=11$ ГГц; д) $f=12$ ГГц; е) $f=13$ ГГц; ж) $f=14$ ГГц; з) $f=15$ ГГц; и) $f=16$ ГГц; к) $f=17$ ГГц; л) $f=18$ ГГц

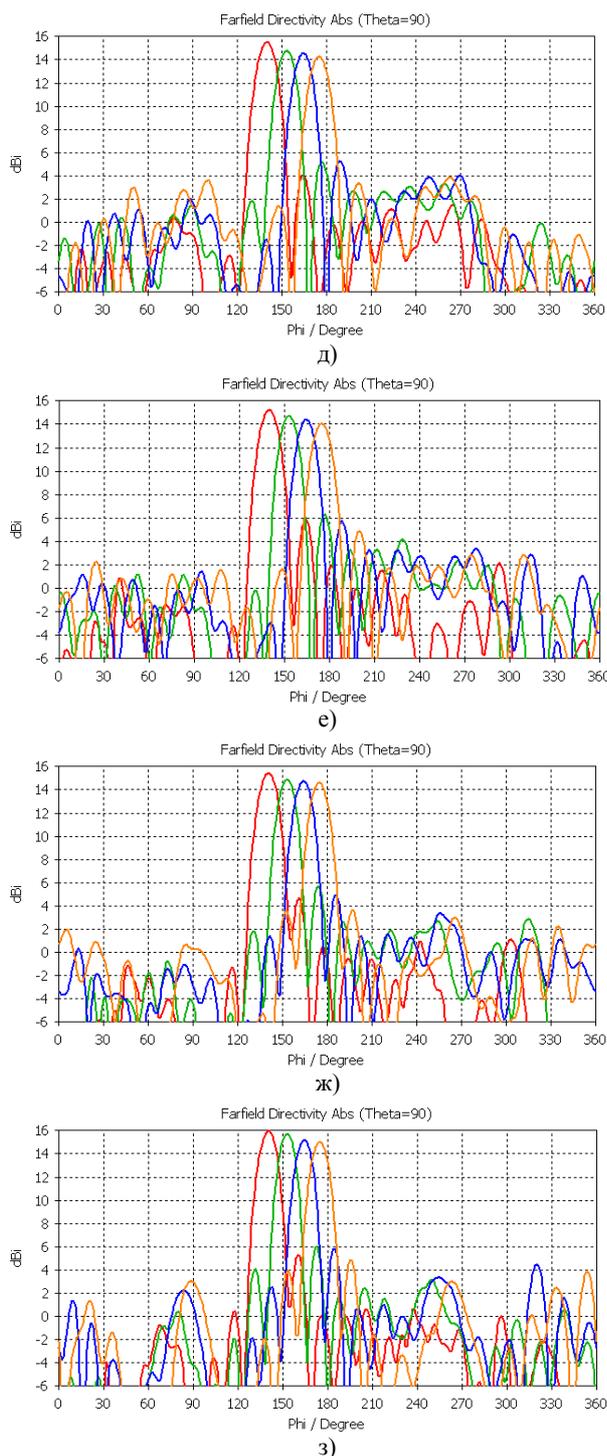


Рис. 6. ДН ФАР при запитке 1-4 портов в азимутальной плоскости, дБ для следующих частот:
 а) $f=8$ ГГц; б) $f=9$ ГГц; в) $f=10$ ГГц; г) $f=11$ ГГц;
 д) $f=12$ ГГц; е) $f=13$ ГГц; ж) $f=14$ ГГц; з) $f=15$ ГГц;
 и) $f=16$ ГГц; к) $f=17$ ГГц; л) $f=18$ ГГц
 (продолжение)

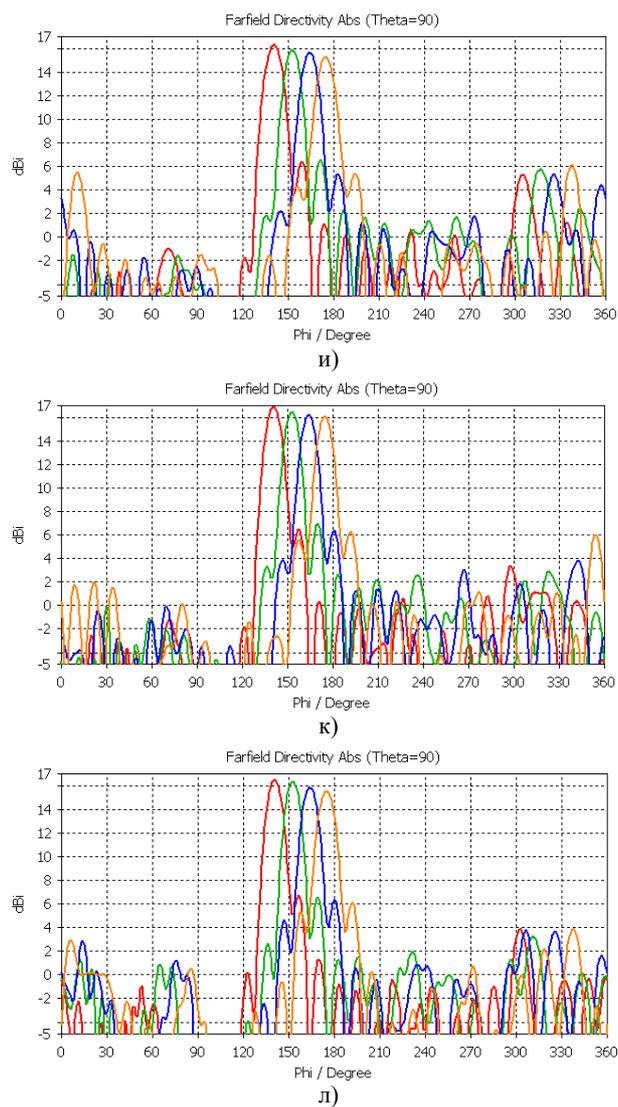


Рис. 6. ДН ФАР при запитке 1-4 портов в азимутальной плоскости, дБ для следующих частот:
 а) $f=8$ ГГц; б) $f=9$ ГГц; в) $f=10$ ГГц; г) $f=11$ ГГц;
 д) $f=12$ ГГц; е) $f=13$ ГГц; ж) $f=14$ ГГц; з) $f=15$ ГГц;
 и) $f=16$ ГГц; к) $f=17$ ГГц; л) $f=18$ ГГц
 (окончание)

Видно, что на всем исследуемом диапазоне частот, а именно от 8 до 18 ГГц, диаграммы направленности существенно не отличаются, можно заметить только небольшие всплески и затухания в областях боковых лепестков и небольшое увеличение по мощности с увеличением частоты, что является логичным изменением. Это говорит о правильном выборе частоты и корректной работе антенны на данном диапазоне частот.

Модель кронштейна крепления для ФАР

Конструкция такой линзы требует определенного крепления, и такое крепление должно не изменять направленные свойства антенны и не препятствовать распространению энергии. Поэтому мы попытались смоделировать и исследовать модель кронштейна для ФАР, чтобы убедиться в возможности практического использования данной антенной системы. Кронштейн был смоделирован для крепления к плоской поверхности, например ко дну корпуса летательного аппарата (ЛА).

На рис. 7 показана модель многолучевой антенной системы со стальным кронштейном крепления, внутри которого расположены полосковые трансформаторы и фидерные линии, питающие входы антенны. Толщина стали была выбрана равной 2 мм, которая замыкает по постоянному току половинки ТЕМ-рупора, чем обеспечивает также и защиту от молний.

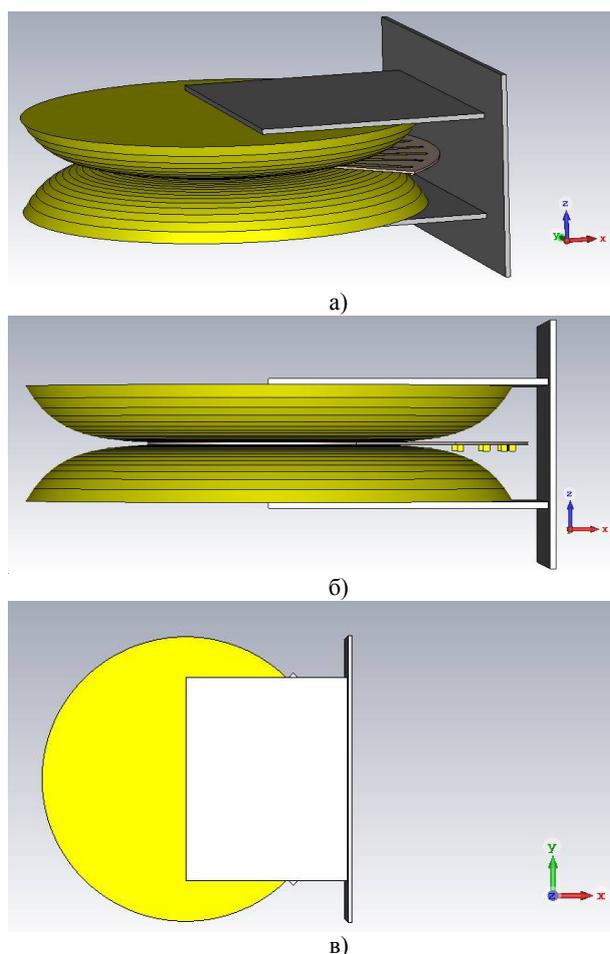


Рис. 7. Модель многолучевой антенной системы со стальным кронштейном крепления:

- а) кронштейн крепления ФАР
- б) вид сбоку
- в) вид сверху

Результаты моделирования ФАР с кронштейном из стали

Как оказалось, наличие кронштейна крепления практически не сказывается на величине суммарных потерь мощности в антенне и качестве согласования ее входов (рис. 9). Потери в материалах ФАР с кронштейном крепления, дБ (верхние кривые) и суммарный КПД (нижние кривые) с учетом потерь в балластных портах и рассогласования показаны на рис. 8.

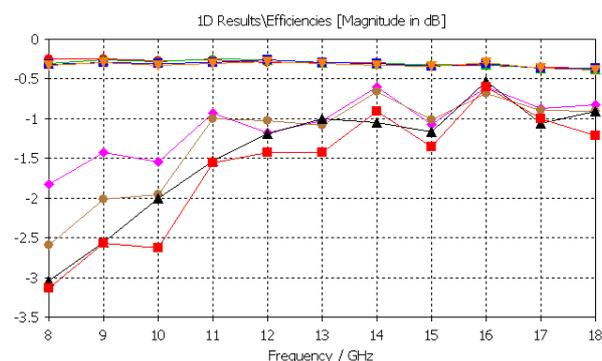


Рис. 8. Потери в материалах ФАР с кронштейном крепления, дБ (верхние кривые) и суммарный КПД (нижние кривые) с учетом потерь в балластных портах и рассогласования

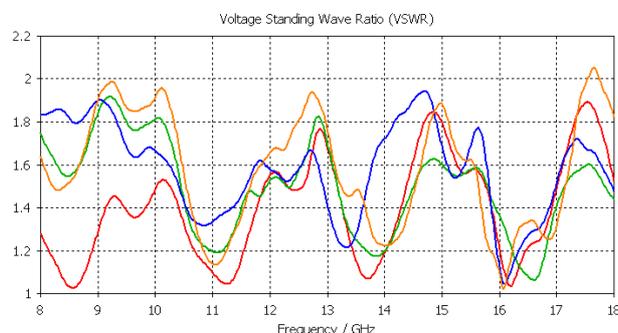


Рис. 9. КСВН ФАР с кронштейном крепления при запитке 1-4 портов

Из рис. 9 видно, что качество согласования входов остается приемлемым все кривые направлены, большого разброса по мощности не происходит.

Однако наличие кронштейна приводит к существенным искажениям диаграмм направленности многолучевой антенной системы (рис. 10). Эту проблему мы решили и скомпенсировали данные погрешности с помощью покрытия внутренних поверхностей кронштейна поглощающим материалом ECCOSORB EGM-40, толщиной 3,2 мм, (рис. 11).

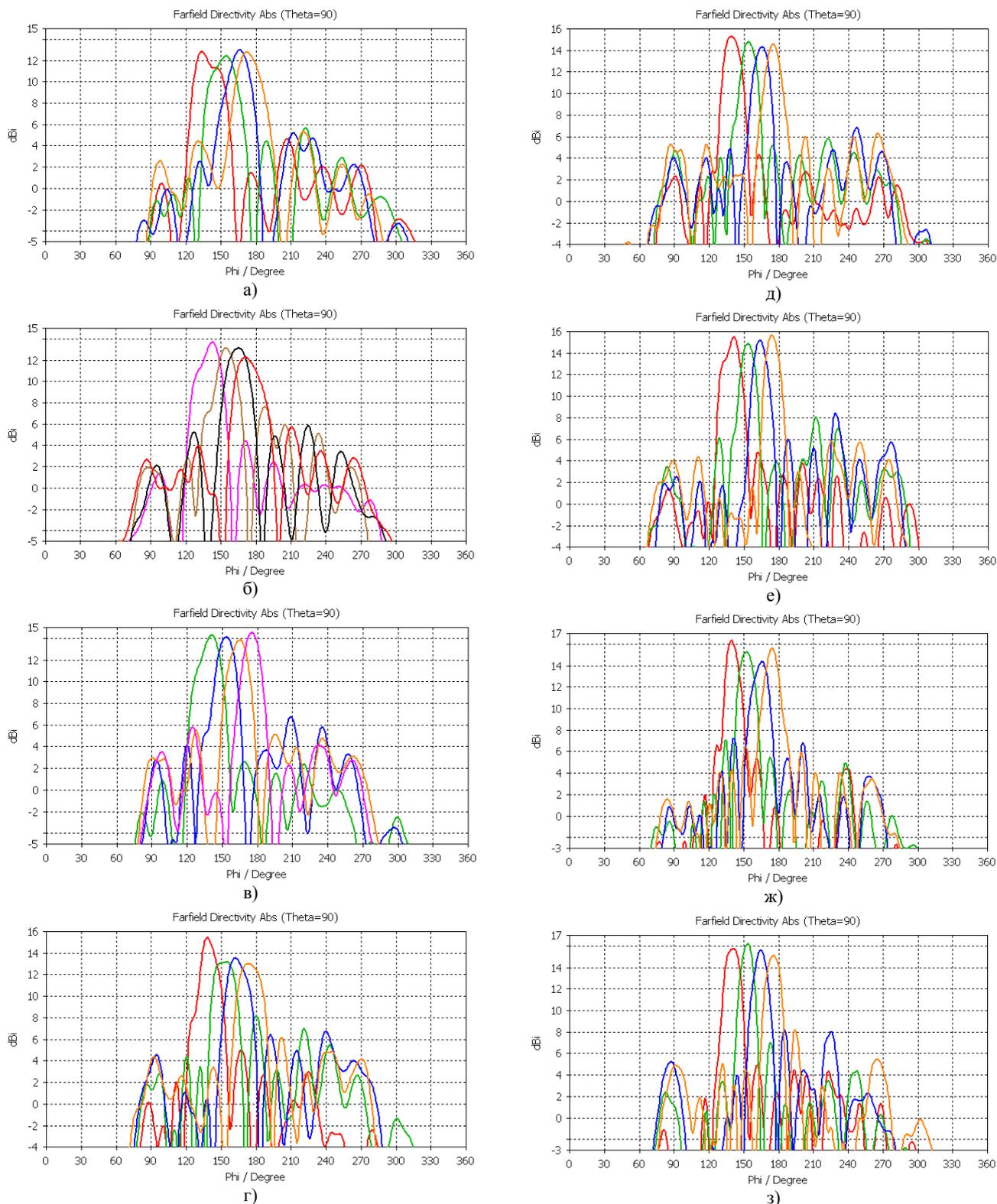


Рис. 10. ДН ФАР с кронштейнным креплением при запитке 1-4 портов:
 а) $f=8$ ГГц; б) $f=9$ ГГц; в) $f=10$ ГГц; г) $f=11$ ГГц;
 д) $f=12$ ГГц; е) $f=13$ ГГц; ж) $f=14$ ГГц; з) $f=15$ ГГц;
 и) $f=16$ ГГц; к) $f=17$ ГГц; л) $f=18$ ГГц

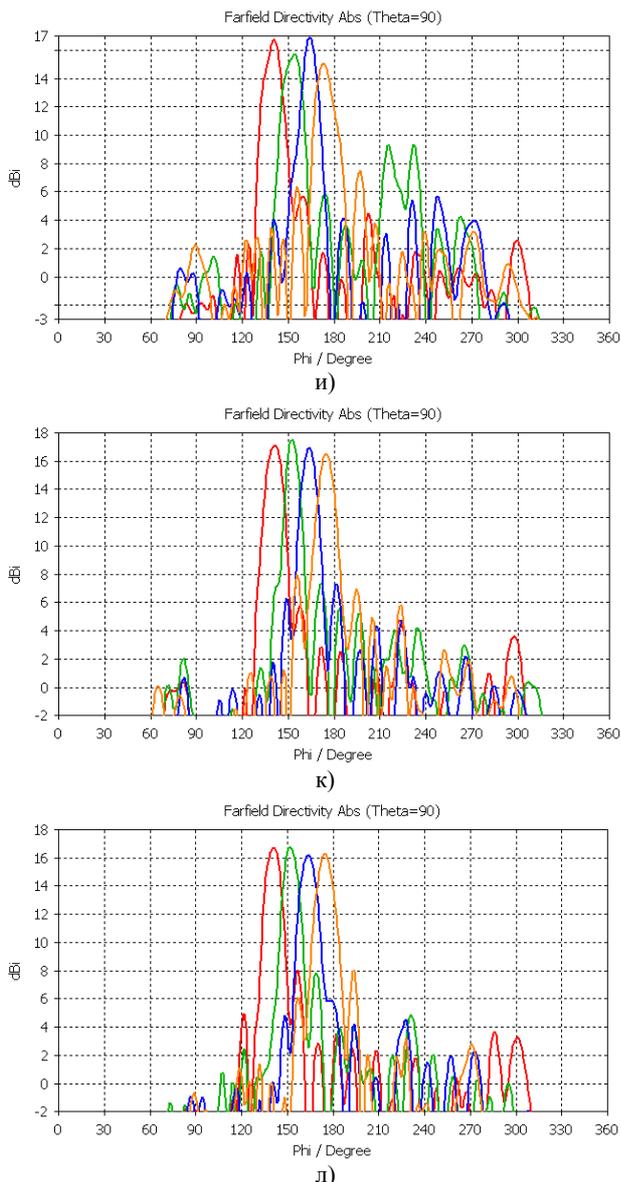


Рис. 10. ДН ФАР с кронштейном крепления при запитке 1-4 портов:
а) $f=8$ ГГц; б) $f=9$ ГГц; в) $f=10$ ГГц; г) $f=11$ ГГц;
д) $f=12$ ГГц; е) $f=13$ ГГц; ж) $f=14$ ГГц; з) $f=15$ ГГц;
и) $f=16$ ГГц; к) $f=17$ ГГц; л) $f=18$ ГГц
(продолжение)

Результаты моделирования ФАР с кронштейном крепления, покрытым поглощающим материалом

Для поглощения излучения и нормализации направленных свойств антенной системы стальной кронштейн необходимо было покрыть поглощающим материалом, таким материалом стал ECCOSORB EGM-40. Ниже приведены результаты моделирования и показаны нормализованные диаграммы направленности такой системы. Частотная зависимость коэффициента отражения от металла, покрытого слоем погло-

тителя ECCOSORB EGM-40 стандартной толщины 3.2 мм, приведена на рис. 12.

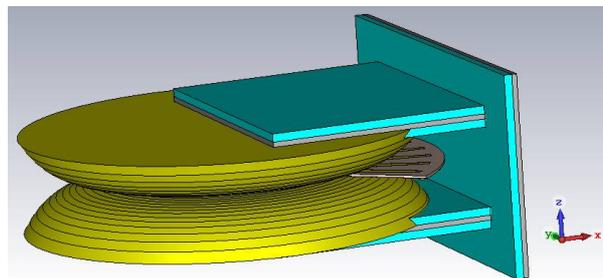


Рис. 11. Кронштейн покрыт слоем поглотителя. Покрытие толщиной 3.2 мм – поглощающий материал ECCOSORB EGM-40

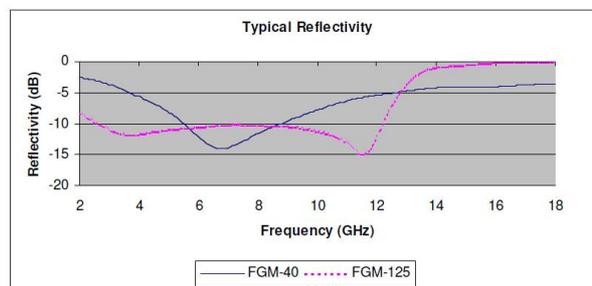


Рис. 12. Коэффициент отражения от металла, покрытого слоем поглотителя ECCOSORB EGM-40 толщиной 3.2 мм

Покрытие кронштейна поглотителем приблизительно на 0.6 дБ увеличивает потери на нижней частоте рабочего диапазона (рис. 13) и позволяет практически полностью устранить искажения диаграммы направленности антенной системы, вызванные отражением электромагнитных волн от кронштейна, рис. 14.

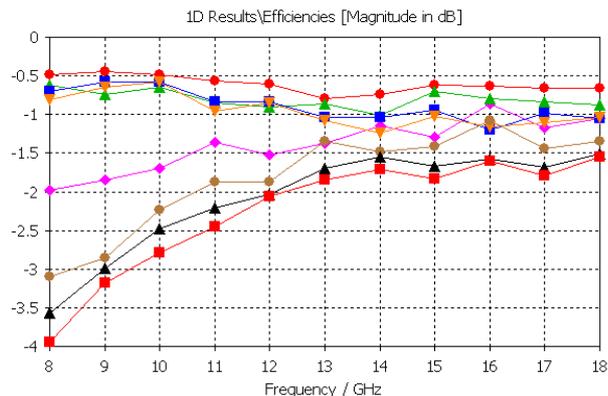


Рис. 13. Потери в материалах, дБ (верхние кривые) и суммарный КПД (нижние кривые) с учетом потерь в балластных портах и рассогласования

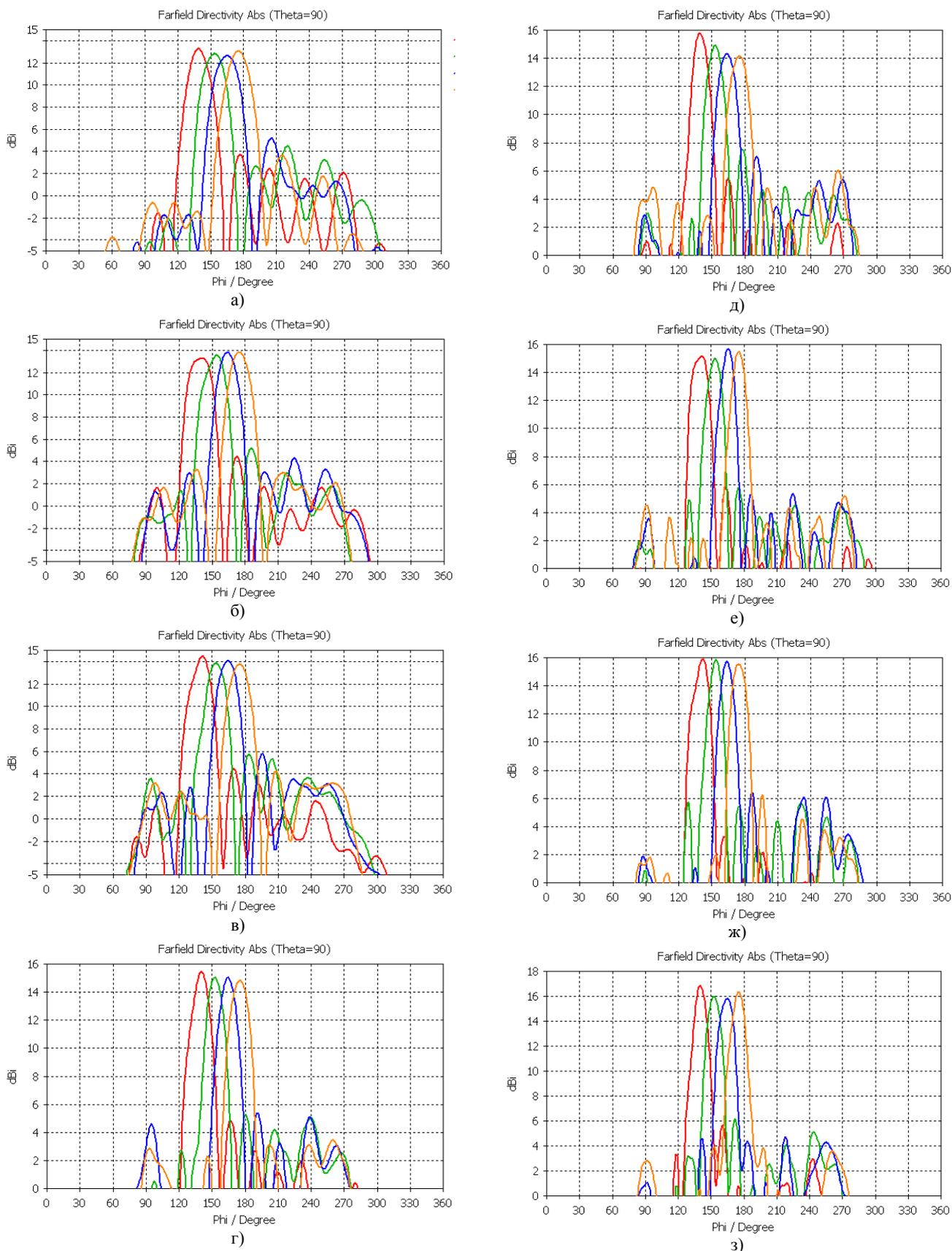


Рис. 14. ДН ФАР с кронштейном крепления и поглощающим покрытием при запитке 1-4 портов:
 а) $f=8$ ГГц; б) $f=9$ ГГц; в) $f=10$ ГГц; г) $f=11$ ГГц; д) $f=12$ ГГц; е) $f=13$ ГГц; ж) $f=14$ ГГц; з) $f=15$ ГГц;
 и) $f=16$ ГГц; к) $f=17$ ГГц; л) $f=18$ ГГц

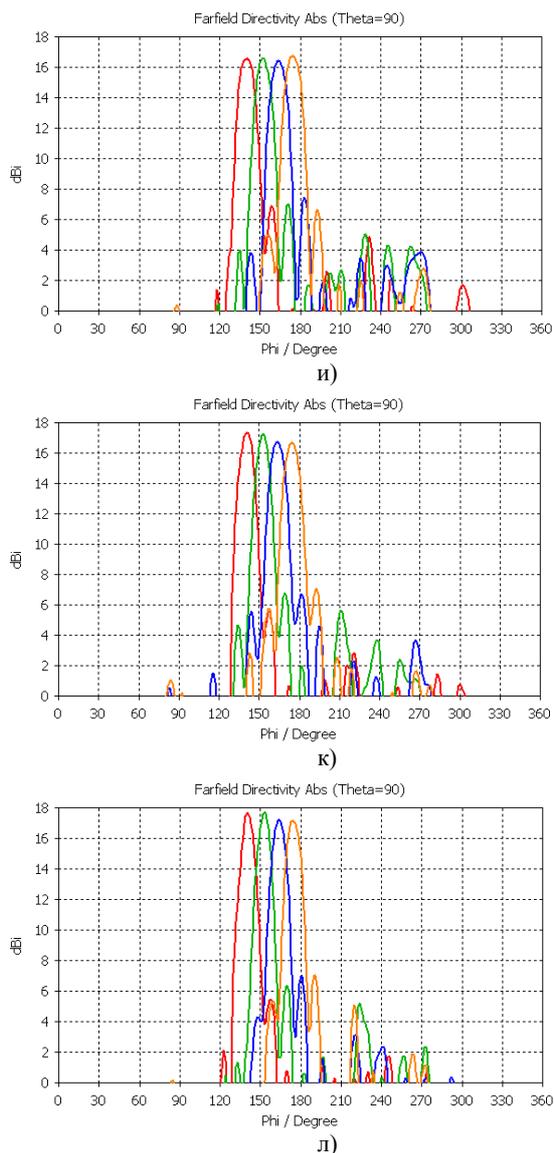


Рис. 14. ДН ФАР с кронштейном крепления и поглощающим покрытием при запитке 1-4 портов: а) $f=8$ ГГц; б) $f=9$ ГГц; в) $f=10$ ГГц; г) $f=11$ ГГц; д) $f=12$ ГГц; е) $f=13$ ГГц; ж) $f=14$ ГГц; з) $f=15$ ГГц; и) $f=16$ ГГц; к) $f=17$ ГГц; л) $f=18$ ГГц (продолжение)

Заключение

Подводя итоги настоящего подраздела необходимо отметить следующее.

При минимальной ширине внешнего концентрического кольца линзы $d - W = 0.25$ мм диаграмма направленности антенной системы получается удовлетворительной, под главными лепестками образуются «пьедесталы», повышающие уровень бокового излучения (при резке диэлектрических колец с помощью ультрафиолетового лазера минимальная ширина перегородки между отверстиями равна 0.05 мм). Устранить данный недостаток можно, исполь-

зуя плоскую линзу Лüneберга с оболочкой.

Наличие кронштейна крепления, замыкающего половинки TEM-рупора по постоянному току и обеспечивающего также молниезащиту, повышает уровень бокового излучения и деформирует диаграмму направленности антенны; однако это не приводит к снижению коэффициента направленного действия и сектор сканирования в азимутальной плоскости сохраняется равным 90° .

Для уменьшения влияния элементов крепления рекомендуется использовать поглощающий материал (в численном эксперименте был использован материал марки ECCOSORB EGM-40 толщиной 3.2 мм).

При сканировании в азимутальном секторе шириной 90° используется 270° излучающей апертуры антенной системы, которая должна быть открытой и не затеняться конструктивными элементами.

Исследования показали, что изменение толщины металла и диэлектрика подложки в пределах, указанных производителем, существенно не влияет на характеристики антенной системы, т.к. в ее конструкции отсутствуют резонансные элементы.

Литература

1. Wide-scan spherical-lens antennas for automotive radars / B. Schoenlinner, X. Wu, J. P. Ebling, G. Eleftheriades, and G. Rebeiz // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2002. Vol. 50. No. 9. Pp. 2166–2175.
2. Grajek P.R., Schoenlinner B., and Rebeiz G.M. A 24-GHz high-gain Yagi-Uda antenna array // IEEE Trans. Antennas Propag. 2004. Vol. 52. No. 5. Pp. 1257–1261.
3. Air-filled parallel-plate cylindrical modified Luneburg lens antenna for multiple-beam scanning at millimeter-wave frequencies / C. Hua, X. Wu, N. Yang, and W. Wu // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2013. Vol. 61, No. 1. Pp. 436–443.
4. Lens antenna for wide angle beam scanning at 79 GHz for automotive short range radar applications / M.K. Saleem, H. Vettikaladi, M.A.S. Alkanhal, and M. Himdi // IEEE Trans. Antennas Propag. 2017. Vol. 65. No. 4. Pp. 2041–2046.
5. Wide-angle scanning phased array using an efficient decoupling network / R.L. Xia, S.W. Qu, P.F. Li, D.Q. Yang, S. Yang, and Z.P. Nie // IEEE Trans. Antennas Propag. 2015. Vol. 63. No. 11. Pp. 5161–5165.
6. Yetisir E., Ghalichechian N., and Volakis J.L. Ultrawideband array with 70° scanning using FSS superstrate // IEEE Trans. Antennas Propag. 2016. Vol. 64. No. 10. Pp. 4256–4265.
7. Rahmat-Samii Y. Array feeds for reflector surface distortion compensation: concepts and implementation // IEEE Trans. Antennas Propag. 1990. Vol. 32. No. 4. Pp. 20–26.
8. Mrstik A. and Smith P. Scanning capabilities of large parabolic cylinder reflector antennas with phased-array feeds // IEEE Trans. Antennas Propag. 1981. Vol. 29. No. 3. Pp. 455–462.
9. Feng P.Y., Qu S.W., Yang S.W., Shen L., and Zhao J.P. Ku-band transmitarrays with improved feed mechanism // IEEE Trans. Antennas Propag. 2018. Vol. 66. No. 6. Pp. 2883–2891.

Информация об авторах

Ашихмин Александр Владимирович – д-р техн. наук, профессор, директор, ЗАО «ИРКОС» (129626, Россия, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: info@ircos.ru

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

Сафонов Фёдор Сергеевич - аспирант кафедры радиоэлектронных устройств и систем, директор регионального консультационного центра «ОПОРА», Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: safonov_fedia93@mail.ru

SWITCHING SCANNING ANTENNA SYSTEM BASED ON A FLAT LUNEBERG LENS WITH CONCENTRIC RINGS

A.V. Ashikhmin¹, Yu.G. Pasternak^{1,2}, V.A. Pendurin³, F.S. Safonov²

¹JSC "IRKOS", Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³Research and Production Enterprise "Automated Communication Systems", Voronezh, Russia

Abstract: scanning antennas with wide-angle scanning capabilities are widely used in the areas such as modern wireless communications and military and civilian radars. Among them, lens antennas with switched beams and phased array antennas (PHAR) attracted considerable attention. In this paper, we consider a variant of the construction of switching scanning PHAR with a diagram-forming scheme in the form of a flat Luneberg lens consisting of a system of concentric dielectric rings placed on a substrate made of Rogers 5880 material. We studied the effect of the PHAR mounting bracket on the presence of its influence on the radiation pattern, the radiation level, the decrease in the directional coefficient, and the level of the scanning sector in the azimuth plane. The maximum diameter of the PHAR is 160 mm, the full height of this antenna is 38 mm. The power supply is carried out using coaxial cables with a wave resistance of 50 Ohms. The diameter of the Luneberg lens itself was chosen 80 mm; the full height of the lens is $H=0.939$ mm. The substrate has a thickness of $t=0.127$ mm, glued with a layer of glue, 0.025 mm thick. The concentric rings on this substrate are 0.787 mm high. Minimum width of the concentric ring (external) $d-W=0.25$ mm (when cutting with a UV laser, the minimum width of the partition between the holes is 0.05 mm). Strip transformers are located on the board made of Rogers 5880 material and have a thickness of $H=0.939$ mm

Key words: mathematical model, Luneberg lens, TEM - horn, directivity pattern, bracket for the PHA

References

1. Schoenlinner B., Wu X., Ebling J.P., Eleftheriades G., Rebeiz G. "Wide-scan spherical-lens antennas for automotive radars," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Sept. 2002, vol. 50, no. 9, pp. 2166–2175.
2. Grajek P.R., Schoenlinner B., Rebeiz G.M. "A 24-GHz high-gain Yagi-Uda antenna array," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, May. 2004, vol. 52, no. 5, pp. 1257–1261.
3. Hua C., Wu X., Yang N., Wu W. "Air-filled parallel-plate cylindrical modified Luneberg lens antenna for multiple-beam scanning at millimeter-wave frequencies," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Jan. 2013, vol. 61, no. 1, pp. 436–443.
4. Saleem M.K., Vettikaladi H., Alkanhal M.A.S., Himdi M. "Lens antenna for wide angle beam scanning at 79 GHz for automotive short range radar applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Apr. 2017, vol. 65, no.4, pp. 2041–2046.
5. Xia R.L., Qu S.W., Li P.F., Yang D.Q., Yang S., Nie Z.P. "Wide-angle scanning phased array using an efficient decoupling network," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Nov. 2015, vol. 63, no. 11, pp. 5161–5165.
6. Yetisir E., Ghalichechian N., Volakis J.L. "Ultrawideband array with 70o scanning using FSS superstrate," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Oct. 2016, vol. 64, no. 10, pp. 4256–4265.
7. Rahmat-Samii Y. "Array feeds for reflector surface distortion compensation: concepts and implementation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Aug. 1990, vol. 32, no. 4, pp. 20–26.
8. Mrstik A., Smith P. "Scanning capabilities of large parabolic cylinder reflector antennas with phased-array feeds," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, May. 1981, vol. 29, no. 3, pp. 455–462.
9. Feng P.Y., Qu S.W., Yang S.W., Shen L., Zhao J.P. "Ku-band transmitarrays with improved feed mechanism," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Jun. 2018, vol. 66, no. 6, pp. 2883–2891.

Submitted 27.02.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Aleksandr V. Ashikhmin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Director of JSC "IRKOS" (21, Zvezdnyy avenue, Moscow 129626, Russia), e-mail: info@ircos.ru

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-Streletskaaya str., Voronezh 394062, Russia), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

Fyedor S. Safonov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: safonov_fedia93@mail.ru

УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЯМИ MPU6050 ПО ШИНЕ I²C НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

А.Б. Буслаев¹, Н.Н. Кошелева², С.С. Белокопытов¹

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

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается модуль GY-521, на котором установлена микросхема MPU6050, объединяющая в одном корпусе акселерометр, гироскоп и температурный датчик. Такие датчики изготовлены на основе микромеханических систем (МЭМС), основным преимуществом которых является малый размер, низкое энергопотребление и небольшая стоимость. Одновременное использование акселерометра и гироскопа позволяет определить изменение движения тела в трехмерном пространстве. Рассмотрены основные характеристики используемого модуля. Управление микросхемы осуществляется с помощью архитектуры интерфейса I²C «ведущий-ведомый». В работе ведомым является MPU6050, а ведущим (производит запрос на чтение или запись данных) является микроконтроллер, имеющий в своем составе аппаратную шину передачи данных I²C. Показана возможная программная реализация алгоритма подключения нескольких ведомых устройств (шести микросхем MPU6050). Представлена принципиальная схема подключения к одному порту ввода-вывода микроконтроллера. Рассмотрен алгоритм работы микроконтроллера с подключенными микросхемами (шестью) MPU6050. Приведены пример программы (с использованием языка ассемблер) инициализации связи с MPU6050, а также программа считывания данных для снятия последних измерений акселерометра, гироскопа, температурного датчика. Применение нескольких модулей с одновременным считыванием с них информации позволяет осуществлять контроль систем управления полетом, имеющих совокупность нескольких управляющих поверхностей и устройств

Ключевые слова: акселерометр, гироскоп, МЭМС, модуль GY-521, микросхема MPU6050

Введение

В современном мире при управлении движением объекта (автомобили, авиация, ракеты), в системах навигации, в машиностроении и измерительной технике нашли широкое применение акселерометры и гироскопы. Такие датчики могут быть изготовлены на основе микромеханических систем (МЭМС), основным преимуществом которых является малый размер, низкое энергопотребление и небольшая стоимость. В работе будем использовать один из самых распространенных подобных датчиков - модуль GY-521 с микросхемой MPU6050. В его состав входит акселерометр (используется для измерения линейных ускорений) [1], гироскоп (используется для измерения угловых скоростей) [1] и датчик температуры. Использование акселерометра и гироскопа в одном приборе дает возможность контролировать изменение движения тела в трехмерном пространстве [1].

Основные характеристики модуля GY-521 с микросхемой MPU6050

Внешний вид используемого в работе

модуля GY-521 с микросхемой MPU6050 изображен на рис. 1.

Рассмотрим основные выводы модуля GY-521: VCC – напряжение питания; GND – земля; SCL – линия тактового сигнала I²C; SDA – линия данных I²C; XDA – линия данных I²C при работе в режиме мастера, для подключения другого датчика; XCL – линия тактового сигнала I²C при работе в режиме мастера, для подключения другого датчика; AD0 – нулевой бит адреса устройства; INT – выходной сигнал MPU6050 [2].



Рис. 1. Внешний вид модуля GY-521 с микросхемой MPU6050

Рассмотрим основные характеристики модуля GY-521:

- Небольшой корпус (4x4x0,9 мм);
- Трехосный МЭМС гироскоп (имеет три 16-разрядных АЦП для оцифровки данных на выходе);
- Трехосный акселерометр (имеет три 16-разрядных АЦП для оцифровки данных на выходе);
- Датчик температуры с цифровым выходом;
- Рабочее напряжение питания микросхемы изменяется от 2,375 до 3,46 В. Однако на плате установлен стабилизатор на 3,3 В, поэтому можно подавать напряжение питания 5 В;
- Буфер FIFO размером 1024 байта, который позволяет снизить энергопотребление системы, благодаря считыванию данных с датчиков в пакетах;
- Пользователь имеет возможность использовать программируемые фильтры для гироскопа, акселерометра и датчика температуры;
- Для связи с регистрами предусмотрен интерфейс I²C, работающий на частоте до 400 кГц [1].

Устройство управления модулями на основе микроконтроллера

Управление микросхемой MPU6050 возможно производить с использованием интерфейса I²C, который на плате GY-521 уже имеется. Рассматривая архитектуру интерфейса I²C, которая осуществляется по принципу «ведущий-ведомый», определим ведомым устройством микросхему MPU6050, а ведущим (производит запрос на чтение или запись данных) микроконтроллер.

Ведомое устройство должно иметь 7-битный адрес, который на данной линии должен быть уникальным и определяется логическим уровнем на выводе AD0 (в нашем случае это 0b1101000 и 0b1101001). Следовательно, передача данных с таких модулей на ведущее устройство по шине I²C может осуществляться только с двух таких устройств (с устройства, имеющего адрес 0b1101000, и устройства с адресом 0b1101001) [1].

При практическом применении микросхем MPU6050 часто возникает проблема использования большого количества датчиков (например, шести).

Применение программного протокола передачи данных I²C в зависимости от количества портов ввода-вывода у микроконтроллера, позволяет реализовать подключение и считывание данных с большого числа модулей.

Рассмотрим возможную программную реализацию алгоритма подключения нескольких ведомых устройств (шести микросхем MPU6050).

На рис. 2 представлена принципиальная схема подключения шести микросхем MPU6050 к одному порту ввода-вывода микроконтроллера, управление и считывание информации возможно при использовании программного протокола передачи данных I²C.

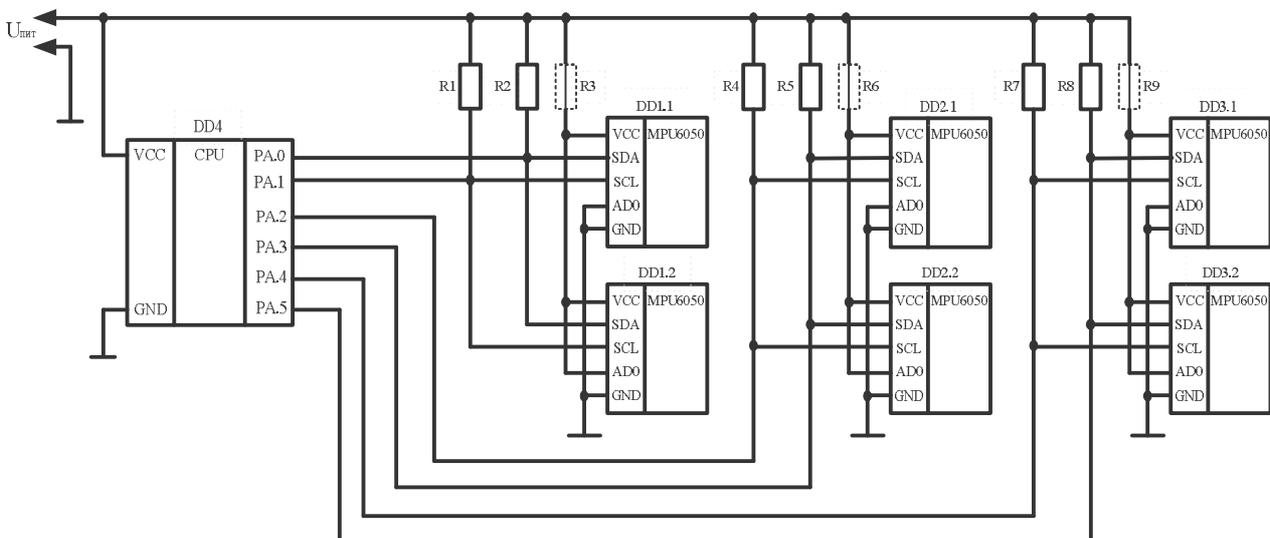


Рис. 2. Принципиальная схема подключения шести микросхем MPU6050 к микроконтроллеру с 8-разрядными портами ввода-вывода

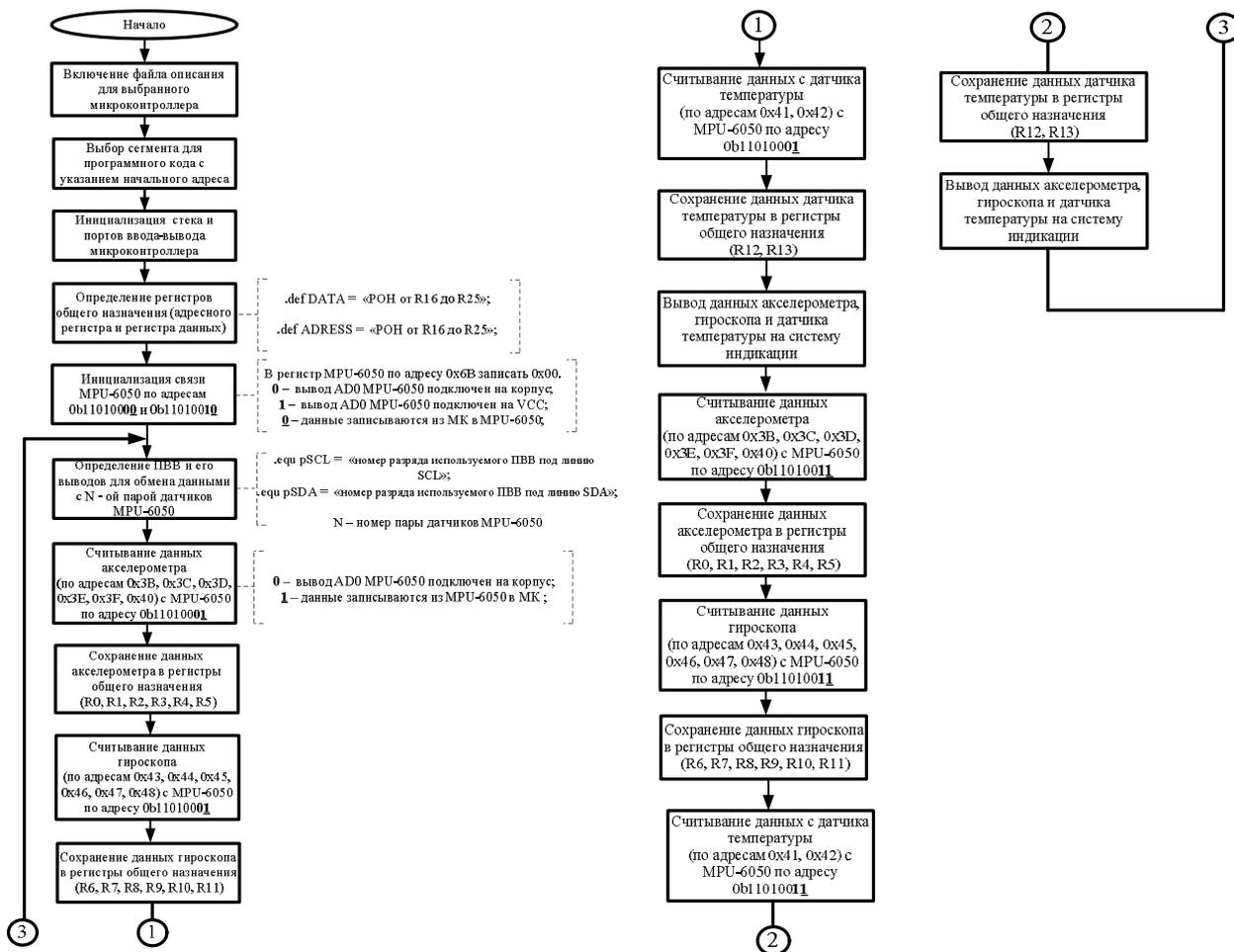


Рис. 3. Алгоритм работы

Алгоритм работы микроконтроллера с подключенными микросхемами MPU6050 представлен на рис. 3.

Пример программы инициализации связи с MPU-6050 (DD1.1) InizMPU_0 представлен в табл. 1. При инициализации связи с MPU-6050 (DD1.2) в регистр data записывается 0b11010010 (строка 8). Описание вызываемых подпрограмм, таких как start, write, stop и rt_ приведены в [3, 4]. Для инициализации связи с MPU-6050 (DD2.1, DD2.2, DD3.1 и DD3.2) необходимо в строчках 2 и 3 изменить номер вывода микроконтроллера, соответственно.

Таблица 1

Инициализация MPU6050 (DD1.1) [3]

№ п/п	Текст программы	Комментарий
1.	InizMPU_0:	
2.	cbi porta, 0	; Установка условие старта на линиях SDA и
3.	cbi porta, 1	; SCL первой пары датчиков
4.	ldi r16, 100	; Определение количества попыток
5.	loop_100:	; прописать адрес выбранной микросхемы (100 попыток).

Продолжение табл. 1

6.	push data	
7.	rcall start	
8.	ldi data, 0b11010000	; Определение направления передачи данных и адреса выбранной микросхемы (DD1.1)
9.	rcall write	
10.	bres rt_	; Проверка сигнала подтверждения ACK на ошибку, если флаг C=1, то вызываем подпрограмму rt_
11.	mov data, 0x6B	; Установка адреса регистра управления питанием.
12.	rcall write	
13.	bres rt	
14.	mov data, 0x00	
15.	rcall write	; Запись в регистр 0x6B числа 0x00
16.	bres rt	; (сброс начальных настроек)
17.	rcall stop	; Установка условия стоп на линиях SDA и SCL.
18.	bres rt	
19.	ret	

Программа считывания данных с MPU-6050 (DD1.1) по адресам 0x3B, 0x3C, 0x3D, 0x3E, 0x3F и 0x40 для снятия последних измерений акселерометра InizMPU_Rd представлена в табл. 2. Результаты измерения сохраняются в регистрах r0, r1, r2, r3, r4 и r5.

Таблица 2
Считывание данных акселерометра с
микросхемы MPU6050 (DD1.1) [3]

№ п/п	Текст программы	Комментарий
1.	IniZMPU_Rd:	
2.	cbi porta, 0	; Установка условие старта на линиях SDA
3.	cbi porta, 1	; SCL первой пары датчиков MPU-6050.
4.	ldi r16, 100	; Определение количества попыток
5.	loop_100:	; прописать адрес выбранного MPU-6050
6.	push data	
7.	rcall start	
8.	ldi data, 0b11010000	; Определение направления передачи данных (запись) и адреса выбранного MPU-6050 (DD1.1)
9.	rcall write	
10.	brcs rt_	; Проверка сигнала подтверждения АСК на ошибку, если флаг C=1, то вызываем подпрограмму rt_
11.	mov data, 0x3B	; Установка начального адреса для считывания
12.	rcall write	; данных акселерометра.
13.	brcs rt_	
14.	rcall start	
15.	ldi data, 0b11010001	; Определение направления передачи данных (чтение) и адреса выбранного MPU-6050 (DD1.1)
16.	rcall write	
17.	brcs rt_	
18.	clc	; Очистка бита переноса АСК
19.	rcall read	; Запись данных с адреса 0x3B в регистр данных data.
20.	mov r0, data	; Перенос данных в регистр r0 (старший байт корд. X)
21.	rcall read	; Запись данных с адреса 0x3C в регистр данных data.
22.	mov r1, data	; Перенос данных в регистр r1 (младший байт корд. X)
23.	rcall read	; Запись данных с адреса 0x3D в регистр данных data.
24.	mov r2, data	; Перенос данных в регистр r2 (старший байт корд. Y)
25.	rcall read	; Запись данных с адреса 0x3E в регистр данных data.
26.	mov r3, data	; Перенос данных в регистр r3 (младший байт корд. Y)
27.	rcall read	; Запись данных с адреса 0x3F в регистр данных data.
28.	mov r4, data	; Перенос данных в регистр r4 (старший байт корд. Z)
29.	rcall read	; Запись данных с адреса 0x40 в регистр данных data.
30.	mov r5, data	; Перенос данных в регистр r5 (младший байт корд. Z)
31.	rcall stop	; Установка условия стоп на линиях SDA и SCL.
32.	brcs rt	
33.	ret	

Для считывания последних измерений гироскопа необходимо строчке 11 (табл. 2) указать начальный адрес 0x43. Все остальное остается без изменений. Для считывания последних измерений с датчика температуры необходимо в строчке 11 (табл. 2) указать начальный адрес 0x41, а строчки с 23 по 30 включительно удалить. Данные гироскопа необходимо сохранить в регистрах r6,r7, r8,r9,r10, r11 (строчки 20, 22, 24, 26, 28, 30 в табл. 2, соответственно). Данные датчика температуры в регистрах r12 и r13 (строчки 20 и 22 в табл. 2, соответственно).

Заключение

С помощью применения предложенного программного управления возможна реализация управления несколькими модулями GY-521. Этот модуль содержит одновременно акселерометр и гироскоп, что позволяет осуществлять контроль над изменением тела в трехмерном пространстве.

Применение нескольких модулей с одновременным считыванием с них информации позволяет осуществлять контроль систем управления полетом, имеющих совокупность нескольких управляющих поверхностей и устройств.

Литература

1. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике / В.А. Жмудь, К.А. Кузнецов, Н.О. Кондратьев, В.Г. Трубин, М.В. Трубин // Автоматика и программная инженерия. 2018. № 3(25). С. 9 – 22.
2. Спецификация: MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 InvenSense: URL: <https://www.invensense.com/wpcontent/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
3. Ревич Ю.В. Практическое программирование микроконтроллеров Atmel AVR на языке ассемблера. 2-е изд., испр. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. С. 322-327.
4. Иванов Ю.И., Югай В.Я. Микропроцессорные устройства систем управления. Таганрог: ТРТУ, 2005. 189 с.

Поступила 10.03.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах

Буслаев Алексей Борисович – канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: bus-alex@yandex.ru

Коселева Наталья Николаевна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vsyu-ppe@mail.ru

Белокопытов Сергей Сергеевич – начальник отделения, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: roman-gunko@mail.ru

MPU6050 MODULE CONTROL UNIT ON THE I²C BUS BASED ON A MICROCONTROLLER

A.B. Buslaev¹, N.N. Kosheleva², S.S. Belokopytov¹

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

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper considers the GY-521 module, which is equipped with the MPU6050 chip, which combines an accelerometer, a gyroscope and a temperature sensor in one housing. Such sensors are made on the basis of micromechanical systems (MEMS), the main advantages of which are small size, low power consumption and low cost. The simultaneous use of an accelerometer and a gyroscope allows you to determine the change in the movement of a body in three-dimensional space. We considered the main characteristics of the module used. The control of the chip is carried out using the architecture of the I²C interface "master-slave". In operation, the MPU6050 is the host, and the master (makes a request to read or write data) is a microcontroller that has an I²C hardware data bus. We show a possible software implementation of the algorithm for connecting multiple slave devices (six MPU6050 chips). We present a schematic diagram of the connection to a single I/O port of the microcontroller. We consider the algorithm of operation of the microcontroller with connected chips (six) MPU6050. We give an example of a program (using the assembly language) for initializing communication with the MPU6050, as well as a program for reading data for taking the latest measurements of the accelerometer, gyroscope, and temperature sensor. The use of several modules with simultaneous reading of information from them allows you to control flight control systems that have a set of several control surfaces and devices

Key words: accelerometer, gyroscope, MEMS, module GY-521, chip MPU6050

References

1. Zhmud' V.A., Kuznetsov K.A., Kondrat'ev N.O., Trubin V.G., Trubin M.V. “Accelerometer and gyroscope MPU6050: the first activation on STM32 and study of readings in statistics”, *Automation and Software Engineering (Avtomatika i programnaya inzheneriya)*, 2018, no. 3(25), pp. 9-22.
2. Specification: MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4 InvenSense, available at: <https://www.invensense.com/wpcontent/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
3. Revich Yu.V. “Practical programming of Atmel AVR microcontrollers in assembly language” (“Prakticheskoe programmirovaniye mikrokontrollerov Atmel AVR na yazyke assemblera”), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2011, pp. 322-327.
4. Ivanov Yu.I., Yugay V.Ya. “Microprocessor control systems” (“Mikroprotsessornye ustroystva sistem upravleniya”), Taganrog, TRTU, 2005, 189 p.

Submitted 10.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Aleksey B. Buslaev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 398600, Russia)

Natal'ya N. Kosheleva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vstu-ppe@mail.ru

Sergey S. Belokopytov, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 398600, Russia)

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРИЕМНИКОВ
ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ****В.А. Махров^{1,2}, А.В. Найденов²**¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**²**ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России», г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассмотрена задача обнаружения радиолокационных дискретных составных частотных сигналов широкополосными приемниками с программными обнаружителями. Данный тип сигналов нашел большое применение в радиолокации благодаря высокой помехоустойчивости и энергетической скрытности. Для их обнаружения часто используют широкополосный энергетический обнаружитель, который измеряет энергию принятого сигнала, сравнивая ее с пороговым уровнем, и на основе этого выносит решение о наличии либо отсутствии сигнала. Недостатком таких устройств является факт срабатывания их на одиночные отчеты, которые могут и не являться полезным сигналом. За счет того, что обнаружение ведется в широкой полосе частот, ухудшаются возможности приема таких сигналов. Для повышения возможностей приема составных частотных сигналов применяются программные обнаружители. За счет определенных правил принятия решения возрастает качество обнаружения, а одиночные отчеты более не принимаются. В результате была разработана методика, позволяющая провести оценку вероятности правильного и ложного обнаружения сигналов широкополосным приемником с программным обнаружителем в системах связи с применением широкополосных сигналов на примере радиолокационных дискретных составных частотных сигналов. Показано преимущество применения программной обработки

Ключевые слова: широкополосный приемник, широкополосные сигналы, отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума, энергетическая скрытность

Введение

В настоящее время большое распространение получили радиоэлектронные средства (РЭС) с широкополосными сигналами [1], которые обладают повышенной энергетической скрытностью за счет пониженного уровня мощности и шумоподобной структуре [2]. Обнаружение таких сигналов требует широкополосных приемников, имеющих широкую мгновенную полосу обзора, следствием чего является повышенный уровень собственных шумов приемника. Увеличение собственных шумов приводит к тому, что ухудшаются возможности приемника по обнаружению сигналов, поэтому для решения этой проблемы применяются приемники широкополосных сигналов, использующие методы некогерентной обработки сигналов за счет сбора информации и анализа сигналов в частотно-временном пространстве с помощью программной обработки. Указанные обстоятельства обуславливают актуальность вопросов в оценке возможностей широкополосных приемников с программными обнаружителями сигналов.

Целью данной статьи является разработка методического подхода к оценке возможностей широкополосных приемников с программной

обработкой при обнаружении сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

Широкополосный приемник сигналов с ППРЧ

Рассматриваемая схема широкополосного приемника представлена на рис. 1.

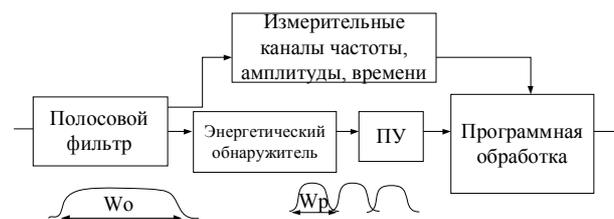


Рис. 1. Структурная схема широкополосного приемника

Обнаружение сигналов ведется в области частот, где наблюдаются радиолокационные дискретные составные частотные сигналы с внутриимпульсной ППРЧ. Такие сигналы кратковременные. Составляющие сигнала разнесены во времени, то есть в определенный момент времени передача составной части сигнала ведется на одной частоте. Мощности передатчиков в радиолокации составляют Мегаватты. Несовпадающие сигналы (непрерывные и квазинепрерывные) вырезаются режекторными

фильтрами. Совпадающие по времени импульсные составляющие ввиду неоднозначности измерений исключаются из обработки с применением специальных схем защиты. Обнаружение сигналов от разных радиоэлектронных средств ведется с низкой вероятностью их совпадения по времени. В результате проблем неоднозначности приема не возникает.

Для обнаружения подобных сигналов часто применяется широкополосный приёмник, включающий полосовой фильтр с мгновенной полосой обзора W_0 , равной диапазону перестроения сигнала.

Энергетический обнаружитель содержит квадратичный детектор, который производит перенос сигнала на нулевую частоту, что позволяет принимать сигналы на различной частоте. На выходе детектора стоит фильтр нижних частот с полосой, равной удвоенной величине разрешающей способности приемника W_p , а время накопления сигнала T_p является обратной величиной W_p . Данный фильтр пропускает спектральные составляющие сигнала на нулевой частоте. Сигнал с выхода фильтра сравнивается с пороговым уровнем, в результате чего на основе критерия Неймана-Пирсона [3] принимается решение о наличии (1 бит) либо отсутствии сигнала (0 бит). Нулевая гипотеза H_0 характеризует случай присутствия в канале только шума, а альтернативная H_1 смеси сигнала и шума. Плотности вероятности распределения будут различными. В соответствии с этим критерием вероятность ложного обнаружения является фиксируемой величиной. Целевыми являются значения вероятностей приема сигнала от 0.5 до 0.9. Недостатком данной схемы является тот факт, что решение о наличии сигнала будет приниматься на все одиночные отсчеты составного сигнала, амплитуда которых превысила порог. Следствием этого является высокий уровень порога, что ухудшает возможности обнаружения таким приемником энергетически скрытых сигналов. В данном приемнике могут применяться схемы, которые будут вырезать постоянные помехи в эфире. Они являются адаптивными, то есть в случае исчезновения из эфира этой помехи данная область частот не будет вырезаться. Достоинством данных приемников является их простота. Они находят применение в том случае, если нужно только обнаружить сигнал. Окончательное решение о том, был ли это сигнал или нет, принимается человеком-оператором.

Для повышения достоверности приема сигналов можно рекомендовать схему обнаружителя с программной обработкой. На входе приемника имеются специальные схемы, которые также позволяют адаптивно вырезать постоянные помехи в эфире. Имеются схемы, позволяющие вырезать сигналы, которые в маловероятном сценарии появились на входе приемника одновременно. За счет наличия в данном приемнике измерительных каналов в случае принятия пороговым устройством решения о наличии сигнала происходит измерение его частоты, амплитуды, времени появления, длительности. Вся полученная информация группируется в слово цифровых данных, называемое дескрипторным словом импульса. Хранится информация в буферной памяти. В процессоре реализованы функции, позволяющие определить, новое это слово или нет. Размер окна, которым принимается решение о наличии сигнала, определяется разработчиком для передаваемых сигналов в данной полосе частот. В том случае, если появятся новые сигналы в эфире, то они обнаруживаться не будут. Для их обнаружения необходимо будет изменить правило о принятии решения о наличии сигнала. При таком подходе достоверность обнаружения повышается за счет снижения требований к энергии сигнала при том же уровне ложных тревог, так как решение о наличии сигнала происходит в полосе $W_{п0}$ и в течение времени $T_{п0}$, где предположительно наблюдается сигнал, изменяющийся по закону ППРЧ. Просмотр всей полосы W_0 происходит стробом данного размера, что позволяет за счет накопившейся информации о ложных тревогах повышать вероятность верного обнаружения сигнала. За счет схем логики суммирование энергии сигнала и шума происходит, когда в половине из всех временных интервалов накопления сигнала T_p есть отклик, то есть если в стробе, к примеру, размером 3 на 3 будет сигнал распознан только один раз, то обнаружитель не примет решение о наличии сигнала. В результате снижается вклад шумов, что позволяет обнаруживать сигнал с меньшей энергией. Фрагмент частотно-временной панорамы приведен на рис. 2, где деление на ячейки $T_p W_p$ условно. После этого информация поступает на процессор, который сортирует дескрипторные слова, определяет интервалы между импульсами, определяет параметры импульсных последовательностей. Недостатком данной схемы является ее усложнение и увеличение габаритов приемника. До-

стоинством же является сниженный порог принятия решения о наличии сигнала и возросшие вероятности правильного обнаружения сигнала при той же энергии сигнала. Также обнаружитель не будет воспринимать одиночные отсчеты за сигналы. Окончательное решение о том, был принят сигнал или нет, может в этом приемнике осуществляться автоматически или оператором.

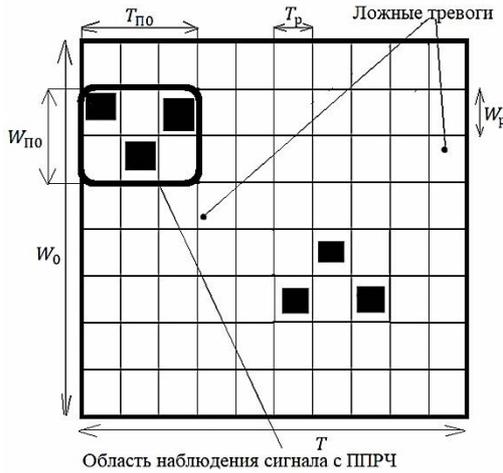


Рис. 2. Частотно-временная панорама обнаружителя с программной обработкой

Число частотных интервалов M_f можно определить из отношения:

$$M_f = \frac{W_0}{W_p}. \quad (1)$$

Количественно оценить возможности широкополосных приемников можно, построив зависимость вероятности обнаружения сигнала от вероятности ложного обнаружения. Также зависимость вероятности обнаружения сигнала от отношения энергии сигнала в ячейке панорамы к спектральной плотности мощности шума S . Проведем расчет на примере гауссовского шума.

Методика расчета

На входе широкополосного приемника, представленного на рис. 1, присутствует стационарный гауссовский процесс с нулевым средним. Спектральная плотность мощности шума ограничена по полосе. Математическое ожидание μ и дисперсия σ^2 случайной величины на входе решающего устройства принимаются равными:

$$\begin{aligned} \mu &= T_p W_0 + S, \\ \sigma^2 &= T_p W_0 + 2S. \end{aligned} \quad (2)$$

Нормальная функция распределения имеет вид [3]:

$$F(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-z^2/2} dz. \quad (3)$$

Аппроксимации функции нормального распределения:

$$\begin{cases} f(x) = 0.5 + 0.5\sqrt{1 - e^{-2x^2/\pi}}, \text{ если } x \geq 0; \\ f(x) = 0.5 - 0.5\sqrt{1 - e^{-2x^2/\pi}}, \text{ если } x < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Выражение для обратной функции:

$$\begin{cases} g(p) = \sqrt{\frac{-\pi}{2} \ln(1 - (2p - 1)^2)}, \text{ если } p > 0; \\ g(p) = -\sqrt{\frac{-\pi}{2} \ln(1 - (1 - 2p)^2)}, \text{ если } p \leq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Вероятности ложной тревоги Q_F и правильного обнаружения Q_D широкополосного приемника без программной обработки в стробе размером $T_p W_0$, где n - порог:

$$Q_F = 1 - f((n - T_p W_0) / \sqrt{T_p W_0}), \quad (6)$$

$$Q_D = 1 - f\left(\frac{n - T_p W_0 - S}{\sqrt{T_p W_0 + 2S}}\right). \quad (7)$$

Относительно нормализованного порога n получим:

$$n = g(1 - Q_F) \sqrt{T_p W_0} + T_p W_0. \quad (8)$$

Зная вероятность Q_D , можно найти требуемое отношение S :

$$\begin{aligned} S &= \\ &= n - T_p W_0 + (g(1 - Q_D))^2 - g(1 - Q_D) \times \\ &\times \sqrt{2n - T_p W_0 + (g(1 - Q_D))^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Полученные зависимости приведены для широкополосного приемника без программной обработки на рис. 3 – 6, когда решение о наличии сигнала принимается в стробе размером $T_p W_0$.

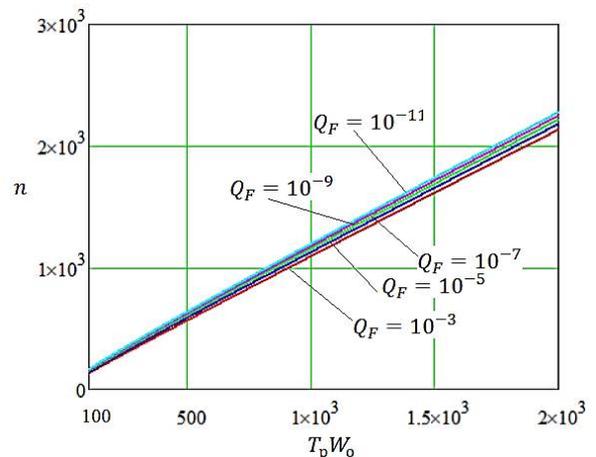


Рис. 3. Величина порога в зависимости от произведения $T_p W_0$ при заданных вероятностях ложных тревог

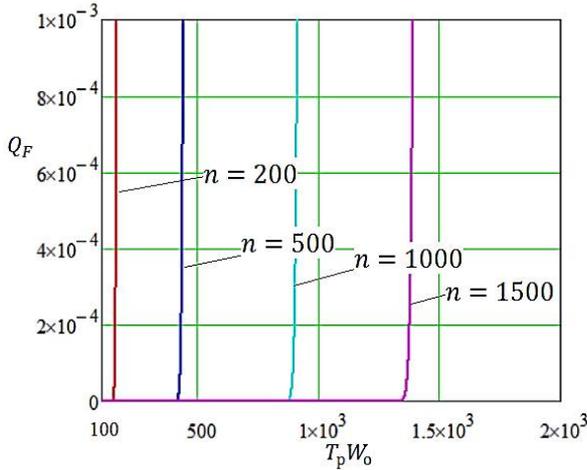


Рис. 4. Вероятность ложной тревоги в зависимости от произведения $T_p W_0$ при заданной величине порога

Из полученных графиков можно сделать вывод о том, что с ростом $T_p W_0$ требуется больший уровень порога, который тем выше, чем меньший уровень ложных тревог надо обеспечить. Также с увеличением $T_p W_0$ необходимо более высокое отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума в ячейке панорамы, чем большая необходима вероятность правильного обнаружения сигнала, тем большее нужно и это отношение. За счет увеличения полосы канала можно обеспечить лучшую помехоустойчивость и энергетическую скрытность. Поэтому и возникает необходимость в использовании сигналов с ППРЧ в широкой полосе частот. Зависимость Q_D от S приведена на рис. 7.

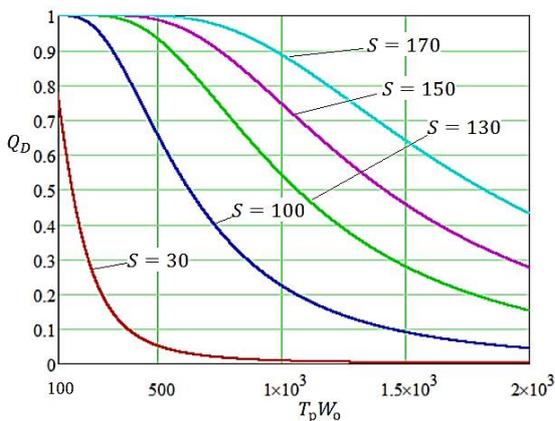


Рис. 5. Вероятность обнаружения сигнала в зависимости от произведения $T_p W_0$ при заданном отношении энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума в строке размером $T_p W_0$ и $Q_F = 10^{-5}$

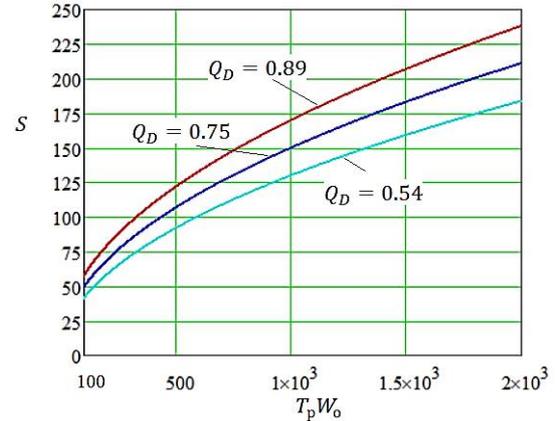


Рис. 6. Отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума в строке размером $T_p W_0$ в зависимости от произведения $T_p W_0$ при заданной вероятности обнаружения сигнала в строке и $Q_F = 10^{-5}$

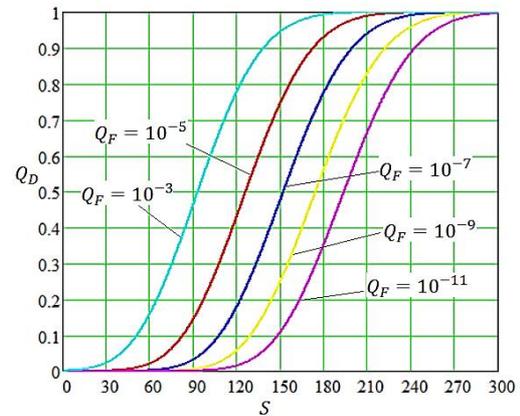


Рис. 7. Вероятность обнаружения сигнала в строке размером $T_p W_0$ в зависимости от отношения энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума в строке при заданных вероятностях ложных тревог и $T_p W_0 = 1000$

Дальнейший расчет будет проведен для приемника с полосой обзора $W_0 = 1$ ГГц, числом частотных интервалов $M_f = 1000$, откуда $W_p = 1$ МГц, что находит применение в современных системах. Для приемника с программной обработкой решение о приеме сигнала будет осуществляться в строке с $W_{П0} = 10$ МГц и длительностью $T_{П0} = 10$ мкс, откуда число частотных интервалов M и число временных интервалов N составит:

$$M = \frac{W_{П0}}{W_p} = \frac{10 \times 10^6}{10^6} = 10, \quad (10)$$

$$N = T_{П0} \times W_p = 10 \times 10^{-6} \times 10^6 = 10. \quad (11)$$

В широкополосном приемнике с программной обработкой сигналов с ППРЧ для обеспечения на выходе обнаружителя суммарной вероятности ложного обнаружения $P_F = 10^{-5}$ требуется найти Q_F в строке $T_p W_0$, а затем по (8) определить величину порога. То есть сравнения приемника с программной об-

работкой и без нее будут проведены при фиксированном уровне ложной тревоги 10^{-5} .

$$P(i, N) = \begin{cases} \binom{N}{i} (1 - (1 - Q_F)^M)^i (1 - Q_F)^{M(N-i)}, & \text{при } i \leq n; \\ 0, & \text{при } i > N. \end{cases} \quad (12)$$

Данное выражение определяет вероятность того, что i из N откликов превысят порог в отсутствие сигнала.

В результате вероятность ложного обнаружения на всем интервале наблюдения составит:

$$P_F = \sum_{i=\frac{N}{2}}^N P(i, N). \quad (13)$$

Суммирование происходит от минимального значения числа откликов, необходимых для принятия решения о наличии сигнала.

Рассматривая приемник без программной обработки для нахождения суммарной вероятности ложного обнаружения P'_F на выходе решающего устройства, из (12) можно получить формулу для ложного срабатывания на всем интервале, так как $N = 1$ и $M = 1$:

$$P'_F = 1 - (1 - Q_F)^M. \quad (14)$$

Откуда в (14) находится значение Q_F , обеспечивающее $P'_F = 10^{-5}$. Аналогично, по (8) определяется значение уровня порога. Результаты внесем в табл. 1.

Таблица 1

Вероятность ложных тревог

Тип приемника	Вероятность ложной тревоги в ячейке, Q_F	Величина порога, n
Без программной обработки	10^{-8}	1163.577
С программной обработкой	3.459×10^{-3}	1082.032

Далее, исходя из данных условий находится требуемое отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума в стробе для обеспечения необходимой вероятности обнаружения сигнала Q_D . Вероятность обнаружения сигнала в конце интервала выборки P'_D для приемника с программной обработкой определяется по формуле:

$$P'_D = 1 - (1 - Q_D)(1 - Q_F)^{M-1}. \quad (15)$$

Аналогично формуле (13), вероятность обнаружения сигнала на всем интервале наблюдения P_D в приемнике с программной обработкой может быть найдена:

$$P_D = \sum_{i=\frac{N}{2}}^N \sum_{j=0}^i \binom{N_i}{j} P'_D{}^j (1 - P'_D)^{N_i-j} P(i - j, N - N_i). \quad (16)$$

Под N_i понимается целое число выборочных интервалов, равное 10 в данном случае. Из (15) для приемника без программной обработки получаем, что вероятность обнаружения сигнала $P''_D = Q_D$. На рис. 8 представлены две зависимости вероятности обнаружения сигнала от S .

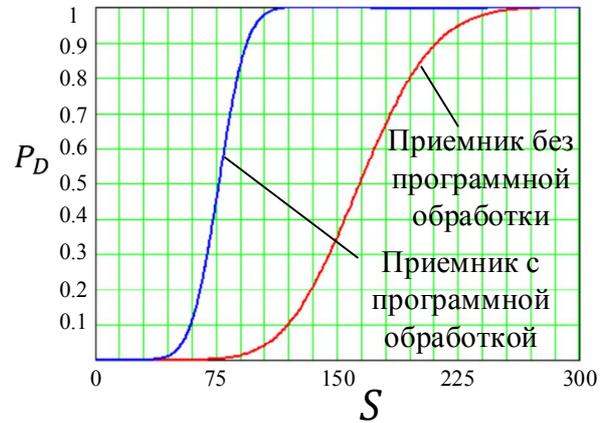


Рис. 8. Вероятность обнаружения сигнала на выходе широкополосного приемника с программной обработкой и без нее при суммарной вероятности ложных тревог $P_F = 10^{-5}$

В случае обнаружения сигнала в шуме информация о ложных тревогах упрощает процесс нахождения полезного сигнала. В результате из рис. 8 видно, что требования к отношению энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума в стробе для обеспечения сопоставимого уровня обнаружения сигнала снизились, что демонстрируется в табл. 2.

Таблица 2

Требуемое отношение энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума в стробе

Вероятность обнаружения сигнала	Приемник с программной обработкой	Приемник без программной обработки
	S	S
0.5	76.7	163.3
0.6	79.8	173.2
0.7	83.5	183.1
0.8	87.8	194.8
0.9	94	210.9

Требования к энергии сигнала для его обнаружения широкополосным приемником с программной обработкой снижаются до 55 % по сравнению с приемником без обработки в диапазоне от 0.5 до 0.9.

Заключение

В результате анализа широкополосных приемников приходим к выводу, что примене-

ние программной обработки позволяет снизить требования к энергии сигналов до 55 % по сравнению со схемой без нее.

В свою очередь, это приводит к повышению энергетической скрытности сигналов за счет возможности использования сигналов с меньшей энергией. Снижается величина порога.

Также программная обработка позволяет принимать сигналы с большим уровнем ложных тревог в строге.

Получена методика, позволяющая оценить возможности широкополосных приемников

сигналов с ППРЧ.

Литература

1. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.
2. Беккиев А.Ю., Борисов В.И. Базовые принципы создания помехозащищенных систем радиосвязи // Теория и техника радиосвязи. 2014. № 1/2014. С. 5-18.
3. Болховская О.В. Основы теории обнаружения при обработке сигналов: учеб.-метод. пособие. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. 47 с.

Поступила 18.02.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах

Махров Валерий Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); младший научный сотрудник, ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России» (394020, Россия, г. Воронеж, ул. 9 Января, д. 280а), тел. +7 (952) 106-88-73, e-mail: Valery99Mahrov@yandex.ru
Найденев Александр Владимирович - канд. техн. наук, начальник отдела, ФАУ «ГНИИИ ПТЗИ ФСТЭК России» (394020, Россия, г. Воронеж, ул. 9 Января, д. 280а), тел. +7 (920) 468-84-58, e-mail: pranic@yandex.ru

ESTIMATION OF THE CAPABILITIES OF BROADBAND RECEIVERS FOR DETECTING BROADBAND SIGNALS

V.A. Makhrov^{1,2}, A.V. Naydenov²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Federal Autonomous Establishment «GNII PTZI FSTEC of Russia», Voronezh, Russia

Abstract: we considered the problem of detecting radar discrete composite frequency signals by broadband receivers with software detectors. This type of signal is widely used in radar due to its high noise immunity and energy secrecy. To detect them, a broadband energy detector is often used, which measures the energy of the received signal, comparing it with a threshold level, and, based on this, makes a decision on the presence or absence of a signal. The disadvantage of such devices is the fact that they are triggered for single reports, which may not be a useful signal. Due to the fact that the detection is carried out in a wide frequency band, the ability to receive such signals is impaired. To improve the reception capabilities of composite frequency signals, software detectors are used. Due to certain decision rules, the quality of detection increases, and single reports are no longer accepted. As a result, we developed a technique that makes it possible to assess the probability of correct and false signal detection by a broadband receiver with a software detector in communication systems using wideband signals using the example of discrete composite frequency radar signals. Here we show the advantage of using software processing

Key words: broadband receiver, broadband signals, signal energy to noise power spectral density ratio, energy secrecy

References

1. Makarenko S.I., Ivanov M.S., Popov S.A. "Noise protection of communication systems with pseudo-random tuning of the operating frequency" ("Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi s psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty"), monograph, St. Petersburg, Svoye izdatel'stvo, 2013, 166 p.
2. Bekkiev A.Yu., Borisov V.I. "Basic principles of creating noise-immune radio communication systems", *Theory and Technology of Radio Communication (Teoriya i tekhnika radiosvyazi)*, 2014, no. 1/2014, pp. 5-18.
3. Bolkhovskaya O.V. "Fundamentals of the theory of detection in signal processing" ("Osnovy teorii obnaruzheniya pri obrabotke signalov"), Nizhny Novgorod State University, 2015, 47 p.

Submitted 18.02.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Valeriy A. Makhrov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); junior researcher, FAI «GNII PTZI FSTEC of Russia» (280a 9th January st., Voronezh 394020, Russia), tel.: +7 (952) 106-88-73, e-mail: Valery99Mahrov@yandex.ru
Aleksandr V. Naydenov, Cand. Sc. (Technical), head of department, FAI «GNII PTZI FSTEC of Russia» (280a 9th January st., Voronezh 394020, Russia), tel.: +7 (920) 468-84-58, e-mail: pranic@yandex.ru

МЕТОДИКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА MDR32F9Q2I В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА

М.В. Хорошайлова, А.В. Чернышов, Д.А. Леденев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: разработана методика, обеспечивающая полный спектр организации работ по программированию микроконтроллера MDR32F9Q2I, которая позволяет получить, в частности, системы управления и мониторинга источников вторичного электроснабжения. Программирование микроконтроллера, построенного на базе высокопроизводительного процессорного RISC ядра ARM, производилось в интегрированной среде разработки Eclipse IDE в операционной системе Windows 10 Pro. Интегрированная среда разработки Eclipse выбрана как наиболее удобная и доступная среда, поддерживает всевозможные типы языков программирования и непрерывную компиляцию. В настоящее время 16- и 32-битные микроконтроллеры быстро набирают популярность в сфере промышленных задач. Их применение обусловлено постоянно возрастающей сложностью задач, жесткими требованиями к производительности интегрируемых контроллеров управления, необходимостью иметь в электронных устройствах развитые органы пользовательского управления. Представленный стенд для моделирования, использующий интерфейсный мост между шиной I2C и 1-Wire – DS2482-100, преобразует протоколы между управляющим I2C микроконтроллером (мастером) и ведомыми 1-Wire устройствами, а также контролирует скорости нарастания и уменьшения напряжения в линии. Основой для написания класса DS2482 являются заголовочные файлы Arduino.h и OneWire.h, которые находятся в свободном доступе

Ключевые слова: микроконтроллер, интегрированная среда разработки, процессорное ядро, операционная система, формат исполняемых и связующих файлов

Введение

В последние годы в России наблюдается заметное увеличение вложений в развитие решений Интернета вещей (IoT). Связано это, в частности, с получением еще более автоматизированных систем контроля и диагностики как в рамках промышленности, так и в системах индивидуального назначения (SmartHouse). В таких решениях используют микроконтроллеры (МК) с ARM-архитектурой, использующие набор инструкций Reduced Instruction Set Computing (RISC), и соответствующей периферией или готовые системы на кристалле (SoC), в состав которых также входят МК ARM. Необходимо отметить, что также IoT-системы базируются и на процессорах x86, использующие набор функций Complex Instruction Set Computing (CISC), но таковые системы являются устаревшими и сложными.

Основные преимущества RISC над CISC в рамках использования в IoT-системах:

1. Сокращенный набор команд, определенный в результате анализа программ для основных областей применения CISC.
2. Упрощенный блок декодирования команд.

3. Уменьшенное энергопотребление.

Рассмотренный ранее отечественный МК MDR32F9Q2I имеет ядро ARM Cortex-M3 RISC ревизии 2.0 [3]. Сайт-производитель предоставляет необходимые исходные файлы для начальной работы с данным МК. Данный выбор отечественного МК основывался на относительной доступности источников литературы, а также наличии отладочной платы LDM-K1986BE92QI с CD-диском, содержащим базовые библиотеки.

Условия лицензирования позволяют свободно пользоваться данными исходными файлами.

В качестве интегрированной среды разработки (IDE) выбрана свободная IDE разработки кроссплатформенных приложений Eclipse IDE. Данный выбор базируется на условиях лицензирования данной IDE. Eclipse Public License (EPL) внесена в список лицензий бесплатного программного обеспечения Free Software Foundation (FSF) и одобрена Open Source Initiative (OSI).

Цель работы

Получение пробного проекта, состоящего из C (C99) и C++11 (C11) и компиляции в единый elf-файл, отладочного бинарного файла прошивки МК. Это инициализирующий этап в

достижении основной цели работы — получение системы управления и мониторинга источников вторичного электроснабжения.

Настройка IDE

Проект выполнен в Eclipse ver.2019-12, java ver._jre1.8.0_261 [4]. Далее приведён список программных средств реализации сборки среды разработки МК с архитектурой ARM:

1. Eclipse IDE for C/C++ Developers [4];
2. GNU ARM Eclipse Plugin [4];
3. GNU ARM Embedded Toolchain [4]. Это

комплекс необходимых программных решений, таких как компилятор C (gcc), компилятор C++ (g++), линкер (ld), средство загрузки прошивки (gdb).

4. GNU MCU Eclipse Build Tools [4]. Это набор утилит, автоматизирующих процесс преобразования исходных файлов в объектные и последующую компоновку в исполняемые файлы или библиотеки.

5. GNU MCU Eclipse OpenOCD [4]. Это программное решение для предоставления связи между gdb и отладчиком МК.

6. Zadig 2.4 [3]. Это утилита для установки USB-драйверов на ПК с ОС Windows. Для работы требует .NET Framework не ниже 3.5.

7. J-Link drivers [4].

Сборка свободной IDE для данного МК всегда имеет индивидуальные проблемы. Наиболее встречаемые подробно рассмотрены на форуме официального сайта АО «ПКК Миландр» [4]. Также для более быстрого старта в данной IDE предусмотрено встроенное руководство пользователя.

Все подключаемые программные средства отображаются в Help → About Eclipse IDE → Installation Details.

В случае ручной сборки IDE рекомендуется в переменных среды пользователя указать пути до исполняемых файлов кросскомпилятора, компилятора объектных файлов и отладчика, в противном случае необходимо будет задать таковые пути в настройках проекта:

1. {...}\Build Tools\2.12-20190422-1053\bin;
2. {...}\GNU Tools ARM Embedded\6 2017-q1-update\bin;
3. {...}\OpenOCD\0.10.0-12-20190422-2015\bin.

Настройка отладчика

Для программирования МК при помощи отладчика J-Link необходимо настроить связь

OpenOCD с ПО от SEGGER [4]. На данном этапе необходимо заменить USB-драйвер для J-Link на драйвер libusb. Делается это с помощью утилиты Zadig 2.4.

Далее необходимо создать конфигурацию отладки GDB OpenOCD Debugging в Eclipse и в окне Debugger в поле Config options нужно ввести - «-f interface/jlink.cfg -f target/mdr32f9q2i.cfg». При вводе данной строки в командную строку ОС произойдет telnet-соединение с МК согласно рис. 1.

```

Microsoft Windows [Version 10.0.18362.30]
(c) Корпорация Майкрософт (Microsoft Corporation), 2019. Все
права защищены.

C:\Users\lacher\OneDrive\Desktop>openocd -f interface/jlink.cfg -c "transport
select swd" -f target/mdr32f9q2i.cfg
GNU MCU Eclipse OpenOCD, 64-bit Open On-Chip Debugger 0.10.0+
dev-00593-g23ad80df4 (2019-04-22-20:25)
Licensed under GNU GPL v2
For bug reports, read
http://openocd.org/doc/doxygen/bugs.html

swd
adapter speed: 1000 kHz
adapter_nsrst_delay: 100
cortex_m reset_config sysresetreq
Info : Listening on port 6666 for tcl connections
Info : Listening on port 4444 for telnet connections
Info : J-Link ARM / Flasher ARM V3 compiled Sep 24 2014 13:1
5:42
Info : Hardware version: 3.00
Info : VTarget = 3.280 V
Info : clock speed 1000 kHz
Info : SWD DPIDR 0x2ba01477
Info : mdr32f9q2i.cpu: hardware has 6 breakpoints, 4 watchp
oints
Info : mdr32f9q2i.cpu: external reset detected
Info : Listening on port 3333 for gdb connections

```

Рис. 1. Пример работы OpenOCD с отладчиком J-Link

Также для работы могут пригодиться следующие команды:

- «-f interface/jlink.cfg -c "transport select swd" -f target/mdr32f9q2i.cfg \ -c init -c halt -c "flash erase_address 0x08000000 0x20000" -c shutdown».

Стирание памяти программ.

- «-f interface/jlink.cfg -c "transport select swd" -f target/mdr32f9q2i_mod_info_flash.cfg \ -c init -c halt -c "flash erase_address 0x08000000 0x1000" -c shutdown».

Стирание памяти констант.

- «-f interface/jlink.cfg -c "transport select swd" -f target/mdr32f9q2i.cfg \ -c "/*...*/.hex verify reset exit"».

Запись bootloader в МК. Необходимо при наличии ОС в ПО к МК.

Настройка проекта

Главное отличие свободной сборки IDE от проприетарной готовой IDE — инициализация МК, линковка и подключение базовых заголовочных файлов происходит в ручном режиме.

При создании проекта необходимо использовать empty project, в противном случае

можно использовать проект STM32F103xxx с некоторыми поправками [4]. Выбор компилятора при создании проекта не принципиален, т. к. в свойствах проекта будет указан тот, который есть в PATH.

Далее в созданном проекте в свойствах во вкладке MCU подключаем кросскомпилятор, компилятор объектных файлов и отладчик. Если ранее были добавлены соответствующие переменные среды, то ПО отобразится автоматически, в противном случае нужно в ручном режиме указать директории исполняемых файлов.

Далее нужно подключить базовые заголовочные файлы, файл линковки и файл инициализации (.h, .hpp, .ld и .S). Файл ассемблера должен иметь расширение в верхнем регистре, иначе будет проигнорирован при создании makefile. Данные файлы распространяются индивидуально под каждое ядро процессора. В данном случае необходим CMSIS for Cortex-M3 [3].

Далее в созданном проекте в свойствах во вкладке Settings нужно указать расположение до каждого используемого заголовочного файла (include path). Соответственно, если код состоит из файлов как на C, так и на C++, то и в обеих вкладках нужно указать расположения.

Важно соблюдать порядок при указании include paths. Порядок базируется на последовательности использования данных файлов в проекте.

Далее в созданном проекте в свойствах во вкладке Settings нужно указать расположение до файла линковки (MDR32F9Qx.ld).

Итог настройки IDE

При анализе предыдущих этапов настройки IDE получается следующее:

1. Создание проекта, его инициализация;
2. Анализ дерева проекта;
3. Создание makefile, т. е. создание указаний для утилиты make о том, какие файлы необходимо компилировать, с какими параметрами, а также как компоновать в итоговом файле прошивки.
4. Создание объектных файлов утилитой make. Для компиляции make использует toolchain gcc и g++.
5. Компоновка. Make вызывает компоновщик (arm-none-eabi-ld). Идет компоновка всех объектных файлов в один с разрешением .elf (Executable and Linking Format). При наличии необходимых указаний в makefile также создаются файлы .hex и .map.
6. Настройка соединения. Идет вызов OpenOCD с указанием пути к файлу openocd.cfg. Происходит соединение с МК, согласно рис. 1.
7. Команды инициализации в gdb и последующая отладка.

Стенд тестирования

В качестве примера рассмотрен мост между шинами I2C и 1-Wire – DS2482-100 [2]. Схема подключения приведена на рис. 2.

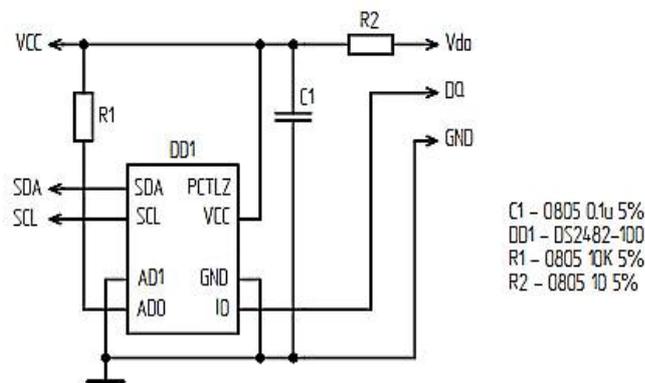


Рис. 2. Подключение DS2482-100

Согласно технической документации на данный мост такое соединение выводов адреса имеет значение 0x32 hex.

VCC – это питающие 3,3 В от МК; SDA – последовательная линия данных; SCL – линия тактового сигнала. SDA и SCL необходимо

подтянуть к VCC через резисторы по 1 кОм. Vdo — питающий контакт датчиков; DQ — последовательная линия данных 1-Wire; GND — вывод общего провода. На выводы Vdo, DQ и GND напрямую подключается датчик температуры DS18B20 [1].

Алгоритм программирования

Передача данных между мастером и ведомым осуществляется по линии SDA и синхронизируется по линии SCL. После завершения передачи информации осуществляется передача в обратную сторону одного бита подтверждения. Каждый принимаемый бит фиксируется принимающей стороной при высоком уровне SCL и может изменяться передатчиком при низком уровне. Изменение линии SDA при высоком уровне SCL является командным состоянием — сигналы «START» и «STOP».

Нормальная передача по интерфейсу I2C включает четыре этапа:

- сигнал «START»;
- передача адреса;
- передача данных;
- сигнал «STOP».

Основой для написания класса DS2482 являются заголовочные файлы Arduino.h и OneWire.h, которые также находятся в свободном доступе. Первоисточником исходных файлов является код, представленный в Технической Заметке № 187, которая доступна на официальном сайте Maxim Integrated.

Основой для взаимодействия с контроллером интерфейса (MDR_I2C) является заголовочный файл из набора библиотек Standard Peripheral Library (SPL) «MDR32F9Qx_i2c.h».

В целях абстрагирования от несущественных сторон написания кода приведен рис. 3.

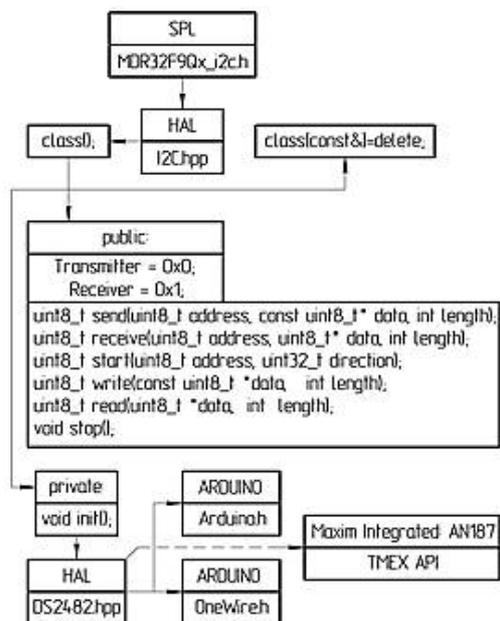


Рис. 3. Структура работы с MDR_I2C

Содержание файла main сводится к инициализации MDR_I2C, одновременному сбросу конечного автомата DS2482 и командам по взаимодействию с датчиком (поиск, запись в scratchpad преднастроек, чтение).

Init. Данный метод инициализирует MDR_I2C:

1. Включение тактирования: 0x40050000;
2. Сброс периферийных устройств до значения по умолчанию;
3. Задание делителя тактовой частоты: 25;
4. Задание скорости интерфейса: 400 кГц;
5. Инициализация периферийного устройства I2C, согласно п. 3 — 4;
6. Включение периферийного устройства I2C.

Send. Данный метод инициализирует отправление сигналов от мастера к ведомому:

1. Отправление 7 бит адреса. Отслеживание ошибки при отправлении каждого бита адреса. Прерывание отправления при успешном отслеживании перечисления ошибок каждого бита адреса.
2. Отправление байта посылки. Отслеживание ошибок аналогично п. 1.

Receive. Данный метод инициализирует получение сигналов от ведомого к мастеру:

1. Ожидание освобождения шины SDA;
2. Прием 7 бит адреса ведомого. Отслеживание ошибок аналогично методу Send;
3. Инициализация начала приёма;
4. Приём битов посылки. Отслеживание флага статуса посылки.
5. Отслеживание состояния шины SDA.

Окончание приема при освобождении шины.

Start. Данный метод инициализирует отправку адреса ведомого устройства. Отправление 7 бит адреса от мастера и отслеживание ошибок посылки аналогично п. 1 команды Send.

Write. Этот метод инициализирует запись данных от мастера к ведомому. Отправление байта данных и отслеживание ошибок, аналогично команде Send.

Read. Данный метод аналогичен команде Receive. Отличие заключается во времени ожидания ответа. Данная команда индивидуальна и зависит от физических параметров канала данных.

Stop. Данный метод инициализирует прерывание чтения или записи данных.

Далее, пользуясь объявлениями и методами из библиотек Arduino, инициализируем связь с методами I2C.

Заключительный этап — написания main:

1. Поиск. Сброс DS2482;
2. Идентификация всех устройств 1-Wire (0xF0);
3. Команда сброса шины;
4. Команда доступа к памяти ведомого без поиска уникального 64-битного адреса;
5. Преднастройки, запись в Scratchpad ведомого (0x4E), запись верхнего предела температуры (0x32), запись нижнего предела температуры (0xEF), запись настройки размера посылки в 9 бит (0x1F);
6. Команда сброса шины;
7. Команда доступа к памяти ведомого без поиска уникального 64-битного адреса;
8. Команда копирования данных из RAM в ROM;
9. Команда сброса шины;
10. Команда доступа к памяти ведомого без поиска уникального 64-битного адреса;
11. Команда преобразования температуры (0x44);
12. Команда сброса линии;
13. Команда поиска по уникальному адресу;
14. Команда сброса поиска на линии;
15. Команда вызова датчика по уникальному адресу;
16. Команда сброса шины;
17. Команда выбора датчика по уникальному адресу;
18. Команда чтения RAM;
19. Команда чтения и цикл преобразования температуры в зависимости от знака ($T < 0$, когда результат > 4095).

Вывод информации осуществлен силами ЖК-дисплея на отладочной плате, согласно рис. 4. Работа с ЖК-дисплеем рассмотрена на рис. 4. Вывод информации можно произвести в командной строке ПК.



Рис. 4. Пример вывода информации на ЖК-дисплей

Заключение

Рассмотренный вариант IDE для embedded-программирования является актуальным на данный момент, т. к.:

1. Используемая IDE не является проприетарной;
2. Полностью настраиваемая IDE дает полное понимание embedded-программисту процесс взаимодействия с МК;
3. Актуальная поддержка Eclipse Foundation и GCC как на данный момент, так и на далеко идущее будущее.

Рассмотренный вариант МК является актуальным, т. к.:

1. Данный МК от отечественного производителя;
2. Библиотеки для работы как с ядром МК (CMSIS), так и с периферией (SPL) в свободном доступе;
3. Программирование отечественных МК является более трудоемким процессом, т. к. на данный момент отсутствует должная поддержка со стороны доступной базы знаний, что приводит к более углубленному изучению проблемы.

Рассмотренный вариант использования DS2482 и DS18B20 является актуальным как для частного использования, так и для коммерческого, т. к.:

1. Элементная база 1-Wire постоянно обновляется;
2. Процесс передачи данных происходит по одной линии, что является удобным вариантом для конструкторской реализации;
3. Элементная база 1-Wire позволяет разработать систему диагностики и контроля при использовании всего одной последовательной линии данных, например монитор батарей DS2438.

Литература

1. DS18S20 High-Precision 1-Wire Digital Thermometer. – datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS18S20.pdf.
2. DS2482-100 Single-Channel 1-Wire Master. – datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS2482-100-DS2482S-100.pdf.
3. Спецификация микроконтроллеров серий 1986BE9x, K1986BE9x и MDR32F9Qx. ЗАО "ПКК "Миландр", 2012.
4. Голубцов М. Микроконтроллер MDR32F9Q2I. Ч. 1. Первое знакомство с микроконтроллером и средствами разработки для него // Современная электроника. 2012. № 3. С. 18- 21.
5. Хорошайлова М.В., Балашов Ю.С., Мушта А.И. Контроль эффективности методов обеспечения целостности сигналов при проектировании современных высокопроизводительных вычислительных устройств // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6-1. С. 108-111.

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летие Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

Чернышов Алексей Валерьевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летие Октября, 84), e-mail: alexicmt1212@gmail.com

Леденев Денис Александрович – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летие Октября, 84), e-mail: lda.20@mail.ru

PROGRAMMING METHOD OF THE MDR32F9Q2I MICROCONTROLLER IN CONTROL AND MONITORING TASKS

M.V. Khoroshaylova, A.V. Chernyshov, D.A. Ledenyev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in this article, we developed a technique that provides a full range of organization of works on programming the MDR32F9Q2I microcontroller, which allows you to obtain control and monitoring systems for secondary power supply sources. The microcontroller based on the high-performance ARM RISC processor core was programmed in the Eclipse IDE on the Windows 10 Pro operating system. We chose the Eclipse integrated development environment as the most convenient and accessible environment, it supports all kinds of programming languages and continuous compilation. Currently, 16- and 32-bit microcontrollers are rapidly gaining popularity in the field of industrial tasks. Their use is due to the ever-increasing complexity of tasks, stringent requirements for the performance of integrated controllers, the need to have advanced user controls in electronic devices. We present a simulation stand that uses an interface bridge between the I2C and 1-Wire buses - DS2482-100, converts protocols between the I2C microcontroller (master) and 1-Wire slaves, and also controls the voltage rise and fall rates in the line. The basis for writing the DS2482 class is the Arduino.h and OneWire.h header files, which are freely available

Key words: microcontroller, integrated development environment, processor core, operating system, format of executable and connecting files

References

1. DS18S20 High-Precision 1-Wire Digital Thermometer, datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS18S20.pdf.
2. DS2482-100 Single-Channel 1-Wire Master, datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS2482-100-DS2482S-100.pdf.
3. Specification of the 1986VE9x, K1986VE9x and MDR32F9Qx series microcontrollers, CJSC "PKK "Milander", 2012.
4. Golubtsov M. "Microcontroller MDR32F9Q2I. Part 1. First introduction to the microcontroller and its development tools", *Modern Electronics (Sovremennayz elektronika)*, 2012, no. 3, pp.18- 21.
5. Khoroshaylova M.V., Balashov Yu.S., Mushta A.I. "Monitoring the effectiveness of methods for ensuring the integrity of signals in the design of modern high-performance computing devices", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9 no. 6-1, pp. 108-111.

Submitted 04.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, tel. +7-910-732-66-13, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

Aleksey V. Chernyshov, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: lda.20@mail.ru, tel. +7-900-309-12-04

Denis A. Ledenyev, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: lda.20@mail.ru, tel. +7-900-924-94-84

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВХОДНЫХ СИГНАЛОВ В МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОМ БЛОКЕ УПРАВЛЕНИЯ

Р.Ю. Кузьменко, И.И. Таболин, А.О. Тищенко, А.Д. Данилов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: приводится методика программно-аппаратного способа компенсации теплового дрейфа напряжения, возникающего в измерительных каналах резистивных датчиков давления и температуры в блоке управления зарядно-разрядным устройством никель-водородной аккумуляторной батареи. Рассмотрена проблема повышения точности и надежности измерения контролируемых параметров для более точного управления режимами батареи в системе энергоснабжения при колебаниях температуры окружающей среды. Показана функциональная схема тракта преобразования аналогового сигнала в цифровую форму с использованием встроенного аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера. Приведены экспериментальные данные исследований влияния температуры на точность измерения сигналов, а также графические иллюстрации максимальной приведенной погрешности 40 каналов измерения. Исследован разброс характеристик температурных датчиков, реализованных в кристаллах нескольких микроконтроллеров. На основании полученных данных выявлены узлы и элементы, вносящие максимальную температурную погрешность в каналы измерения датчиков давления и температуры аккумуляторной батареи. Разработана методика для программно-аппаратной компенсации температурной погрешности преобразования сигналов датчиков. Описаны алгоритм и условия практической реализации метода компенсации суммарной погрешности канала измерения с использованием аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера. Проведена экспериментальная оценка примененного метода расчета в узле формирования телеметрии управления блока электроники, предназначенного для преобразования аналоговых сигналов с датчиков давления и температуры в цифровой код

Ключевые слова: микроконтроллер, блок управления, температурный дрейф, аналого-цифровое преобразование, погрешность измерений

Введение

Аккумуляторная батарея (АБ) в системе энергообеспечения космического аппарата (КА) является пока главным накопителем энергии. На современном этапе при условиях длительной эксплуатации КА на околоземной орбите (10 и более лет) и повышенных требований к надежности находят применение никель-водородные аккумуляторные батареи (НВАБ) [1]. Этот факт заставляет изготовителей НВАБ предъявлять более жесткие требования к точности управления зарядно-разрядным устройством (ЗРУ) в системе энергоснабжения (СЭС) [2], а следовательно, и к точности измерения контролируемых параметров, таких как давление в корпусе аккумуляторов, температура, общее напряжение на АБ и напряжение на каждом аккумуляторном элементе, входящем в батарею. Допустимая погрешность измерений параметров НВАБ в СЭС КА обычно задается не более 1% от диапазона измерений [3].

Приоритетное влияние на ресурс НВАБ оказывают такие эксплуатационные характеристики, как давление и температура (особенно в

конце срока эксплуатации). Поэтому целью данной работы является разработка метода уменьшения влияния температуры окружающей среды на точность измерения данных параметров, используя при этом минимум аппаратных средств.

Постановка задачи

Обеспечение необходимой точности измерений заставляет разработчиков систем электропитания применять внешние многозарядные и температурно-стабильные аналого-цифровые преобразователи (АЦП), что приводит к усложнению изделия из-за необходимости резервирования сигналов и уменьшению общей надежности всей измерительной системы при работе в условиях открытого космоса. При этом не устраняется влияние температурного воздействия внешней среды на другие элементы, входящие в измерительные каналы управления СЭС (генераторов стабильного тока, источников опорных напряжений, операционных усилителей и т.п.), во время штатной эксплуатации батареи и при аварийных ситуациях. В связи с этим возникла задача использования микроконтроллеров (МК) для измерения аналоговых сигналов с заданной точностью, а

именно с помощью встроенного в них АЦП [4], с целью дальнейшего преобразования массива аналогового сигнала в управляющие сигналы ЗРУ [5].

В данной работе исследуется узел формирования телеметрии управления, входящий в блок электроники (БЭ), установленный конструктивно на одном охлаждающем радиаторе НВАБ, а именно модуль формирования аналоговых сигналов датчиков давления и температуры. Поставлена задача отработки программно-аппаратного метода компенсации теплового дрейфа напряжения всего канала измерения при эксплуатации НВАБ в диапазоне температур на охладителе от минус 10 до 40 °С.

Анализ узлов и элементов, вносящих основную погрешность в каналы измерения давления и температуры

В классическую схему преобразования аналоговых сигналов датчиков (ПСД) в цифровую форму обычно входят (рис. 1):

- генератор стабильного тока (ГСТ), подключенный к резистивному датчику, с которого снимается измеряемое напряжение (для датчика температуры – медный повод, для датчика давления – тензодатчик);

- усилительный каскад (УС) с источником опорного напряжения ИОН1 (для усиления и согласования низковольтных сигналов датчиков с диапазоном измерения АЦП микроконтроллера);

- микроконтроллерный блок управления (МБУ), состоящий из источника опорного напряжения (ИОН2), источника питания (ИП) МК, устройства защиты входных и питающих цепей МК от превышения токов и напряжений, и, собственно, микроконтроллера с встроенным АЦП. Выявленное экспериментальным путем влияние температуры окружающей среды (от минус 10 до 40 °С) на уровень максимальной приведенной погрешности каналов измерения напряжения датчиков показано в таблице. Как показал анализ полученных результатов, основную неточность вносят генераторы стабильного тока, вырабатывающие ток для датчиков с целью получения измерительного напряжения (например, микросхема 142ЕР3У – 0,01% на 1 °С) [6]. Если для измерения давления данная погрешность еще допустима (суммарная заданная погрешность всего тракта измерения менее 1 %), то ее значение по температуре выходит за пределы допуска (см. таблицу).

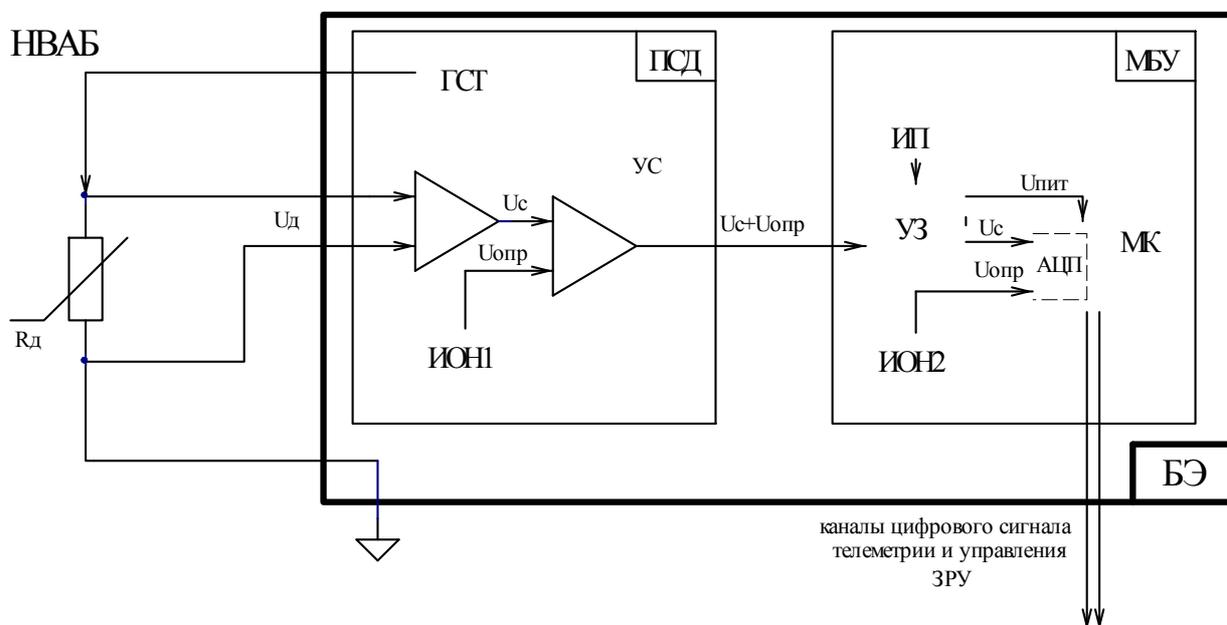


Рис. 1. Схема преобразования аналоговых сигналов датчиков в цифровую форму на примере блока электроники

Максимальная приведенная погрешность напряжения канала измерения

Принадлежность датчика	Ток измерения, протекающий через датчик, мА	Диапазон измерения, мВ	Максимальная погрешность канала измерения, %
Датчик давления	2	0-140	0,75
Датчик температуры	4	380-500	3,5

Алгоритм реализации программно-аппаратного метода компенсации температурного дрейфа

Один из путей решения изложенной проблемы – применение дополнительного датчика температуры внешней среды, что позволит получить корректирующий коэффициент для программного пересчета измеряемого напряжения.

После более детального исследования выяснилось, что относительная погрешность измеренного напряжения в диапазоне температур от -10 до 40°C имеет близкую к линейной зависимость (рис. 2). Данный факт позволил упростить общую формулу перерасчета значений напряжения для получения реальных значений температур и давлений НВАБ. При разработке алгоритма корректировки учитывалась также погрешность, вносимая источником опорного напряжения ИОН2 микроконтроллера (на примере микросхемы N142EN19 – 0,005% на 1 °C [6]), находящегося в МБУ.

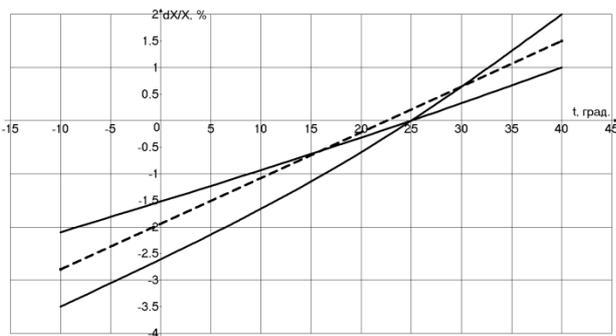


Рис. 2. Зависимость приведенной погрешности измерения от температуры

На рисунке сплошные линии обозначают границы максимального дрейфа напряжения из группы 40 исследованных измерительных каналов для центральной температуры 25 °C, а пунктирная линия – оптимальный график линейной корреляционной функции полученных погрешностей. Как видно, теоретически с помощью корректировки можно уменьшить температурный дрейф до уровня 0,7% при -10 °C и 0,5% при 40 °C на корпусе изделия БЭ, что

полностью удовлетворяет техническому заданию (менее 1%).

В современных микроконтроллерах (например, 1986BE92У фирмы АО «ППК Миландр») [7] датчик температуры установлен на самом кристалле микросхемы, и существует возможность с помощью программного обеспечения разработчика снимать с него показания в битовой форме, но при этом точность показаний разработчиком не гарантируется [3]. Формула пересчета полученных значений бит в градусы Цельсия кристалла МК с 12-разрядным АЦП имеет вид:

$$t^{°C} = 25 - (N_{25} - N_{изм})/k_{пр}, \quad (1)$$

где N_{25} – количество бит при температуре 25°C конкретного экземпляра МК;

$N_{изм}$ – значение измеренных бит (от 0 до 4095);

$k_{пр}$ – коэффициент преобразования бит в °C.

Были исследованы 24 шт. микроконтроллеров типа 1986BE92У и получены следующие результаты: значение бит при 25°C на кристалле было в диапазоне от 1642 до 1831, коэффициент преобразования бит в градусы у всех экземпляров микроконтроллеров был практически одинаков ($k_{пр}$ на границах диапазона -10 и 40 °C принимал значения от 5,77 до 5,88).

Отсюда скорректированное значение напряжения входного сигнала, поступающего с датчика, будет иметь вид:

$$U_{д} = U_{АЦП}/k_{ус} + U_{оп} + f_k(t), \quad (2)$$

где $U_{АЦП}$ – напряжение, поступающее на вход АЦП МК;

$k_{ус}$ – коэффициент усиления канала измерения;

$U_{оп}$ – опорное напряжение в усилительном канале (ИОН1, рис. 1);

$f_k(t)$ – функция напряжения компенсации температурного дрейфа от температуры среды.

Полученная эмпирически функция компенсации напряжения выглядит так:

$$f_k(t) = \alpha \cdot (N_{изм} - N_{25}), \quad (3)$$

где α – экспериментально вычисленный коэффициент, равный $1,85 \cdot 10^{-5}$.

Чтобы функция $f_k(t)$ была оптимальна, необходимо измерить реальное значение бит N_{25} исследуемого контроллера при 25°C на корпусе изделия и вписать данное значение в формулу (3).

Для успешной реализации метода корректировки с помощью микроконтроллерного датчика температуры необходимо выполнить два основных условия:

– генераторы стабильного тока, микроконтроллерный источник опорного напряжения, согласующий усилитель должны находиться рядом или на одной охлаждающей пластине;

– опорные напряжения для согласующих усилителей канала измерения должны формироваться с помощью прецизионных резисторов с источника опорного напряжения микроконтроллера (ИОН 2, рис. 1).

Заключение

Практическая реализация данного метода корректировки показала его эффективность в разработанном блоке электроники, предназначенном для преобразования аналоговых сигналов датчиков давления, температуры в цифровую форму и поэлементного контроля аккумуляторной батареи, а также подачи управляющих команд в зарядно-разрядное устройство НВАБ [2]. При правильно выбранных корректирующих коэффициентах экспериментально измеренный максимальный температурный дрейф напряжения датчика температуры (из 40 исследованных каналов измерения) составил не

более 0,6 %, что более чем в 5 раз лучше, чем до корректировки. Канал измерения давления также показал улучшение параметров, погрешность измерения снизилась до 0,3 % при 0,75% до коррекции.

В итоге можно сказать, что данный метод компенсации температурного дрейфа может найти применение в любом микроконтроллерном канале измерения, если характеристика абсолютной погрешности имеет форму близкой к линейной при эксплуатации изделия в заданном диапазоне температур.

Литература

1. Никель-водородные аккумуляторные батареи [Электронный ресурс]. URL: <http://saturn-kuban.ru/>, доступ свободный (дата обращения 01.03.2021).
2. Данилов А. Д. Тищенко А.О. Алгоритмы управления специализированными исполнительными устройствами систем электрообеспечения МКС // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. 2017. С. 126-128.
3. Данилов А.Д., Кузьменко Р.Ю. Автоматизированная система диагностики и контроля для наземной отработки энергоузлов МКС // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве. 2019. С. 147-150.
4. Шонфелдер Г., Шнайдер К. Измерительные устройства на базе микропроцессора АТmega. СПб.: БХВ-Петербург, Электроника, 2014. С. 141.
5. Данилов А.Д., Тищенко А.О. Исследование энергосберегающих систем электроснабжения космических аппаратов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 5-1. С. 82-84.
6. Регулируемые стабилизаторы напряжения положительной полярности. [Электронный ресурс]. URL: <https://docviewer.yandex.ru/view/290397081/>, доступ свободный (дата обращения 01.03.2021).
7. Спецификация на серию 1986BE9x [Электронный ресурс]. URL: <https://ic.milandr.ru/>, доступ свободный (дата обращения 01.03.2021).

Поступила 02.03.2021; принята к публикации 19.04.2021

Информация об авторах

Кузьменко Роман Юрьевич – аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kuzromik7@yandex.ru

Таболлин Иван Иванович – аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: iwan.tabolin@yandex.ru

Тищенко Артём Олегович – аспирант кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: 89204003472@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, д. 84), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

**METHOD FOR IMPROVING THE ACCURACY OF MEASURING INPUT SIGNALS
IN A MICROCONTROLLER CONTROL UNIT****R.Yu. Kuz'menko, I.I. Tabolin, A.O. Tishchenko, A.D. Danilov****Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

Abstract: the article presents the method of hardware-software compensation of thermal voltage drift in the measuring channels of resistive pressure and temperature sensors in the control unit of the charging and discharging device of a nickel-hydrogen battery. We considered the problem of increasing the accuracy and reliability of the measurement of controlled parameters for more precise control of the operating modes of the batteries in the power supply system when the ambient temperature changes. We show the functional diagram of the path for converting an analog signal into a digital form using the built-in analog-to-digital converter of the microcontroller. We present experimental data on the influence of temperature on the accuracy of signal measurement, as well as graphic illustrations of the maximum reduced error of 40 measuring channels. We investigated the spread of the characteristics of temperature sensors implemented in the crystals of several microcontrollers. Based on the obtained data, we determined the nodes and elements that make up the maximum temperature error in the measurement channels of the pressure and temperature sensors of the battery. We developed a method of hardware-software compensation of the temperature error of the sensor signal conversion. Here we describe the algorithm and conditions of practical implementation of the method of compensation of the total error of the measuring channel using the analog-to-digital converter of the microcontroller. We carried out an experimental evaluation of the applied calculation method in the telemetry generation unit of the electronics unit designed to convert analog signals of pressure and temperature sensors into a digital code

Key words: microcontroller, control unit, temperature drift, analog-to-digital conversion, measurement error

References

1. "Nickel-hydrogen rechargeable batteries" ("Nikel'-vodorodnye akkumulyatornye batarei"), available at: <http://saturn-kuban.ru/>, (access date: 01.03.2021).
2. Danilov A.D., Tichenko A.O. "Algorithms for controlling specialized executive devices of ISS electrical supply systems" *New Technologies in Research, Design, Management, and Production (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovaniy, upravlenii, proizvodstve)*, 2017, pp. 126-128.
3. Danilov A.D., Kuz'menko R.Yu. "Automated diagnostic and control system for ground-based testing of ISS power nodes", *New Technologies in Research, Design, Management, and Production (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovaniy, upravlenii, proizvodstve)*, 2019, pp. 147-150.
4. Schonfelder G., Schneider C. "Measuring devices based on the ATmega microprocessor", St. Petersburg, BHV-Peterburg, Elektronika, 2014, 141 p.
5. Danilov A.D., Tichenko A.O. "Research of energy-saving power supply systems for spacecraft", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol.10, no. 5-1, pp. 82-84.
6. "Adjustable positive polarity voltage regulators" ("Reguliruemye stabilizatory napryazheniya polozhitel'noy polyarnosti"), available at: <https://docviewer.yandex.ru/view/290397081/>, (access date: 01.03.2021).
7. "Specification for 1986VE9x series" ("Spetsifikatsiya na seriyu 1986VE9x"), available at: <https://ic.milandr.ru/>, (access date: 01.03.2021).

Submitted 02.03.2021; revised 19.04.2021

Information about the authors

Roman Yu. Kuz'menko, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kuzromik7@yandex.ru
Ivan I. Tabolin, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: iwan.tabolin@yandex.ru
Artyem O. Tishchenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: 89204003472@mail.ru
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

МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ УМНОЖАЮЩЕГО ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАЛОЙ РАЗРЯДНОСТИ

С.В. Калиниченко^{1,2}, Ю.С. Балашов¹, Д.Г. Харин², А.С. Шнайдер²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлен метод минимизации нелинейности передаточной характеристики прецизионного умножающего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) с помощью вспомогательного корректирующего ЦАП малой разрядности. В данном методе вспомогательный ЦАП формирует искаженную передаточную характеристику, которая в сумме с передаточной характеристикой основного ЦАП позволяет уменьшить результирующую интегральную и дифференциальную нелинейность. Коэффициенты коррекции, рассчитанные согласно представленному в статье алгоритму, однократно записываются в энергонезависимую память и преобразуются в управляющий сигнал для калибрующего ЦАП с помощью арифметико-логического устройства (АЛУ) в зависимости от входных данных. Для проведения экспериментальных исследований был разработан макет системы калибровки на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и демонстрационной платы с микросхемой двухканального 16-разрядного ЦАП с сегментированной структурой. Представлены экспериментальные результаты, которые показывают, что в данной системе коррекции собственная нелинейность калибрующего ЦАП не оказывает существенного влияния на итоговую передаточную характеристику. Приведенный алгоритм расчета коэффициентов позволяет эффективно уменьшить абсолютную интегральную и дифференциальную нелинейность 16-разрядного ЦАП до значений менее 1 единицы веса младшего разряда (ЕМР)

Ключевые слова: прецизионный ЦАП, умножающий ЦАП, нелинейность, калибровка, ПЛИС

Введение

Прецизионные умножающие ЦАП нашли широкое применение в системах сбора и обработки информации, автоматическом тестовом оборудовании, контрольно-измерительной аппаратуре, автоматизированных системах управления, системах калибровки с цифровым управлением, в системах синтеза сигналов, программируемых аттенуаторах.

При проектировании микросхем умножающих ЦАП чаще всего используют сегментированную архитектуру, состоящую из бинарных и унарных матриц резисторов. Чтобы обеспечить разрядность более 12 бит и монотонность передаточной характеристики необходимо использовать специальные методы индивидуальной калибровки. Эти методы позволяют уменьшить эффект случайного и систематического отклонения параметров компонентов схемы в процессе производства.

Применение большинства методов коррекции затруднено, поскольку умножающие ЦАП используют внешнее опорное напряжение. Наиболее распространенным методом коррекции нелинейности умножающих ЦАП является

лазерная коррекция тонкопленочных резисторов на этапе производства пластин либо использование пережигаемых перемычек. Эти методы направлены на улучшение согласования компонентов, за счет чего обеспечивается линеаризация характеристики. Настройка с помощью лазера является простой процедурой с точки зрения схемотехники, но затратной по времени и требующей специального оборудования.

Предложенный в данной работе способ калибровки с помощью корректирующего ЦАП был разработан в качестве альтернативного метода настройки, который обеспечит требуемую нелинейность без использования лазера. Это позволит удешевить и ускорить процесс изготовления микросхем ЦАП. Недостатком данного подхода является усложнение системы. Использование корректирующего ЦАП для минимизации нелинейности является распространенным подходом [1-3]. В [4] представлен подобный метод коррекции нелинейности ЦАП. В нем был использован 16-разрядный калибровочный ЦАП с аттенуатором и технология сегментной калибровки (SCT). В нашей работе будет оценена возможность адаптации и упрощения данного способа применительно к схеме умножающего ЦАП.

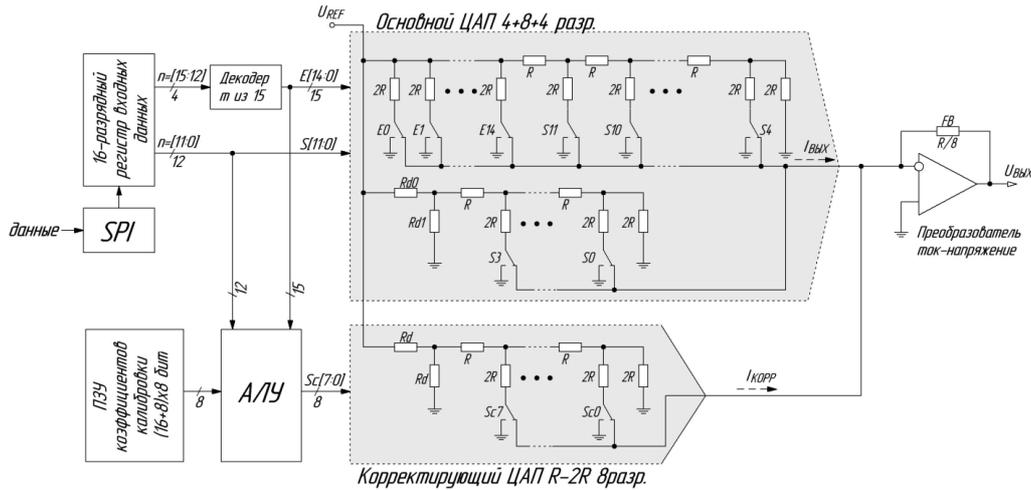


Рис. 1. Структурная схема ЦАП

Описание схемы

Структурная схема одного канала умножающего ЦАП с системой калибровки представлена на рис. 1. Основной 16-разрядный ЦАП ($N=16$) имеет сегментированную архитектуру, состоящую из параллельной 4-разрядной матрицы старших разрядов ($M=4$), 8-разрядной R-2R матрицы средних разрядов и 4-разрядной R-2R матрицы младших разрядов, подключенной к выводу опорного напряжения через резистивный делитель.

Входные данные поступают через последовательный интерфейс и сохраняются в регистр. Младшие 12 разрядов регистра данных непосредственно управляют соответствующими n-MOП ключами R-2R матриц. Старшие 4 разряда регистра данных подключены к преобразователю кода « t из 15» для получения управляющих сигналов ключами параллельной матрицы.

Зависимость выходного тока $I_{ВЫХ}$ от управляющего кода x основного ЦАП при использовании данной сегментированной структуры можно представить в виде суммы токов, формируемых отдельными сегментами:

$$I_{ОСН}(x) = \sum_{k=0}^{k \leq 11} x_k \cdot I_k + \sum_{m=1}^{m \leq D(x)} I_m, \quad (1)$$

где x_k – значение разряда k в двоичном представлении кода x ;

I_k, I_m – выходной ток формируемый ветвью k бинарной матрицы и ветвью m унарной матрицы;

$D(x)$ – функция декодера « t из 15», которая определяет число подключенных к выходу резисторов параллельной R-матрицы в зависимости от кода.

Калибрующий ЦАП состоит из 8-разрядной R-2R матрицы, подключенной к выводу опорного напряжения через делитель. Разрядность калибрующего ЦАП определяет количество дискретных уровней настройки, а опорное напряжение – шаг настройки. В данной системе диапазон настройки составляет $128 \text{ EMP}_{ОСН}$ с шагом $0.5 \text{ EMP}_{ОСН}$. Выбор диапазона обусловлен ожидаемой исходной интегральной и дифференциальной нелинейностью (INL и DNL) основного ЦАП, а шаг – требованием обеспечить результирующие значения INL и DNL менее 1 EMP. Функция корректирующего кода и выходного тока вспомогательного ЦАП согласована с функцией (1) и имеет вид:

$$C(x) = \sum_{k=4}^{k \leq 11} x_k \cdot Ca_k + Ch_{D(x)}, \quad (2)$$

$$I_{КОРР}(x) = \text{caliDAC}\{C(x)\}, \quad (3)$$

где Ca_k – коэффициент калибровки бинарной матрицы;

$Ch_{D(x)}$ – коэффициент коррекции унарной матрицы ЦАП;

caliDAC{} – массив токов передаточной характеристики ЦАП, содержащий 256 значений.

Для калибрующего ЦАП входные данные зависят от диапазонов передаточной характеристики, которые требуется корректировать. В энергонезависимом постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) хранятся коэффициенты калибровки Ca_k, Ch_m , которые рассчитывают индивидуально для каждого канала ЦАП по результатам измерения передаточной характеристики. Блок арифметико-логического устройства служит для выбора и расчета суммы коэффициентов в зависимости от сигнала

входных данных и формирует информационный цифровой сигнал для калибровочного ЦАП по формуле (2).

Характер нелинейности ЦАП связан с его сегментированной структурой [5]. Нелинейность, вызванная рассогласованием элементов старшей параллельной матрицы, имеет непериодический характер. Вся передаточная характеристика делится на $2^M=16$ диапазонов, столько же коэффициентов коррекции требуется определить для ее настройки. Нелинейность R-2R матрицы имеет периодический характер, и для устранения нелинейности требуется число коэффициентов, равное разрядности матрицы. С уменьшением разряда звена R-2R матрицы на 1 бит уменьшается вклад отклонения сопротивления звена в общую нелинейность в 2 раза. Это позволяет уменьшить разрядности соответствующих коэффициентов и отказаться от коррекции самых младших разрядов. В соответствии со структурной схемой ЦАП целесообразно отказаться от настройки R-2R матрицы младших четырех разрядов. Таким образом, всего потребуется 24 коэффициента разрядностью 8 бит.

Алгоритм расчета корректирующих коэффициентов

Корректирующие коэффициенты рассчитываются после измерения передаточной характеристики основного и вспомогательного ЦАП. Для характеристики нелинейности ЦАП целесообразно использовать набор из нескольких специфических точек, позволяющих определить влияние каждого отдельного элемента на нелинейность. Для бинарных матриц представляют интерес пары точек $(2^k-1, 2^k)$, так как переход двоичного кода из $0011...11_2$ в $0100...00_2$ позволяет непосредственно сравнить ток, формируемый группой элементов с током одного элемента и рассчитать его отклонение от идеального приращения, равного $1 \text{ ЕМР}_{\text{ОСН}}$. Для оценки нелинейности, создаваемой элементами унарной матрицы, необходимо провести измерения в парах точек $(2^{N-M} \cdot m-1, 2^{N-M} \cdot m)$.

Передаточная характеристика вспомогательного ЦАП может быть измерена полностью, либо восстановлена из пар точек основных переходов. Все точки передаточной характеристики записываются в массив $\text{caliDAC}\{0..255\}$.

Расчет коэффициентов калибровки начинается с R-2R матрицы. Если разность токов

ΔI_k , рассчитанная в кодах $(2^k-1$ и $2^k)$, меньше $1 \text{ ЕМР}_{\text{ОСН}}$, значит, k -звено матрицы формирует недостаточный ток, и корректирующий ЦАП должен добавлять ток во всех кодовых комбинациях, когда $x_k=1$. Если $\Delta I_k < \text{ЕМР}_{\text{ОСН}}$, то k -звено матрицы формирует избыточный ток, и вспомогательный ЦАП должен выполнить вычитание тока. Так как основной и вспомогательный ЦАП подключены к общему выводу опорного напряжения, вычитание тока реализовано относительно постоянного смещения диапазонов, формируемого вспомогательным ЦАП с помощью коэффициентов $Ch_0..Ch_{15}$. Постоянное смещение должно быть достаточным для относительного вычитания токов в любой комбинации коэффициентов Ca .

Значения корректирующих коэффициентов Ca_k определяются по порядку, от младшего разряда $k=4$ до старшего разряда $k=11$ из выражения:

$$\Delta I_k + \text{caliDAC}\{Ca_k\} \rightarrow 1 \text{ ЕМР}_{\text{ОСН}} \quad (4)$$

После выбора каждого корректирующего коэффициента Ca_k необходимо провести пересчет всех точек передаточной характеристики основного ЦАП, в которых задействован этот коэффициент. То есть требуется пересчитать ток во всех точках 2^k-1 с индексом k , больше текущего, и во всех точках $2^{N-M} \cdot m-1$ по формулам:

$$I(2^k - 1) = I(2^k - 1) + \text{caliDAC}\{Ca_k\}, \quad (5)$$

$$I(2^{12} \cdot m - 1) = I(2^{12} \cdot m - 1) + \text{caliDAC}\{Ca_k\}. \quad (6)$$

В результате выполнения расчета коэффициентов по формулам (3-4) будет снижена локальная дифференциальная нелинейность в матрице средних разрядов.

Следующим шагом калибровки является компенсация отклонения токов унарной матрицы старших разрядов. Значения корректирующих коэффициентов Ch_m определяются по порядку для всех резисторов с индексами от $m=1$ до $m=15$ по разности токов ΔI_m , рассчитанных в кодах $(2^{N-M} \cdot m-1$ и $2^{N-M} \cdot m)$, согласно выражению:

$$\Delta I_m + \text{caliDAC}\{Ch_m\} \rightarrow 1 \text{ ЕМР}_{\text{ОСН}} \quad (7)$$

После выбора коэффициента Ch_m необходимо пересчитать ток в точке $2^{N-M} \cdot (m+1)-1$ по формуле:

$$I(2^{12} \cdot (m+1) - 1) = I(2^{12} \cdot (m+1) - 1) + \text{caliDAC}\{Ch_m\} \quad (8)$$

Чтобы выполнить вычитание тока для диапазона Ch_m , необходимо увеличить все ко-

эффиценты до Ch_{m-1} включительно и рассчитать новые значения токов.

После этого шага все участки передаточной характеристики будут согласованы, то есть значения локальной DNL будут минимальны. Обеспечение минимальной дифференциальной нелинейности унарной матрицы ЦАП не является обязательным условием минимальной интегральной нелинейности. Передаточная характеристика может иметь провалы или подъемы в середине полной шкалы, для компенсации которых требуется уточнить коэффициенты Ch . Как правило, на этом этапе происходит увеличение DNL, а коэффициенты Ch изменяются в небольшом диапазоне относительно ранее рассчитанных значений. Алгоритм пересчета коэффициентов можно представить в виде цикла операций:

1. Найти диапазон передаточной характеристики, в котором находится абсолютный максимум INL.
2. Если INL имеет отрицательное значение, то соответствующий коэффициент Ch необходимо увеличить на 1, иначе – уменьшить на 1.
3. Определить новые максимальные значения INL и DNL с учетом изменения коэффициента и тока $I_{КОРР}$.
4. Если полученный набор коэффициентов обеспечивает лучшие параметры нелинейности, чем ранее достигнутые, то набор коэффициентов сохраняется.

Выполнять действия 1-4 необходимо до достижения требуемых значений INL и DNL или до достижения заданного числа итераций.

Завершающим этапом оптимизации коэффициентов является выбор дополнительного постоянного смещения тока во всех диапазонах кода. Поскольку корректирующий ЦАП обладает собственной нелинейностью, добавление смещения позволяет изменить группы элементов (резисторов), которые формируют ток коррекции, что в некоторых случаях может уменьшить результирующую нелинейность. Если постоянное смещение характеристики преобразователя является критичным, то от данного этапа оптимизации можно отказаться.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные испытания были проведены с помощью макета, состоящего из демонстрационной платы двухканального ЦАП и макетно-отладочной платы ПЛИС Spartan6, а также измерительного комплекса на основе

шасси PXI с модулем источника питания, генератора цифровых сигналов и цифрового мультиметра.

В качестве основного 16-разрядного ЦАП будет использован канал А микросхемы ЦАП. В качестве корректирующего ЦАП выступает канал В микросхемы, при этом во время настройки будут использоваться только младшие 8 разрядов канала В. На канал А поступает опорное напряжение $U_{REFA}=10$ В, а на канал В – напряжение $U_{REFB}=5$ В, то есть $1EMP_B=0,5EMP_A$. В используемой микросхеме ЦАП предусмотрена коррекция нелинейности с помощью пережигаемых лазером перемычек, но для проведения исследования был выбран ненастроенный образец.

Для реализации блоков ПЗУ и АЛУ разработано RTL-описание на языке Verilog, которое было имплементировано на ПЛИС Spartan6 SLX16. Использование ПЛИС для прототипирования цифровой части системы целесообразно, поскольку разработанное и отлаженное RTL-описание в дальнейшем можно использовать для синтеза цифрового блока на кристалле. В дополнение к основным цифровым блокам добавлены два блока последовательного интерфейса SPI: принимающий и передающий. На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для измерения нелинейности ЦАП.

Измерение передаточной характеристики для определения нелинейности происходит следующим образом. Генератор цифровых сигналов формирует последовательную посылку для основного канала ЦАП (канал А). Эту посылку принимает ПЛИС, записывает ее в регистр и без изменений передает на ЦАП. АЛУ использует данные из регистра и формирует адрес корректировочного коэффициента. После расчета корректирующего слова данных по формуле (2) передающий SPI формирует последовательную посылку для канала В. После окончания передачи формируется сигнал $LDAC$, который служит для одновременного обновления выходных регистров двух каналов и запуска преобразования цифрового мультиметра измерительного комплекса. Формирование кодовых последовательностей осуществляется для всего интересующего набора кодов. После всех измерений комплекс рассчитывает интегральную и дифференциальную нелинейность.

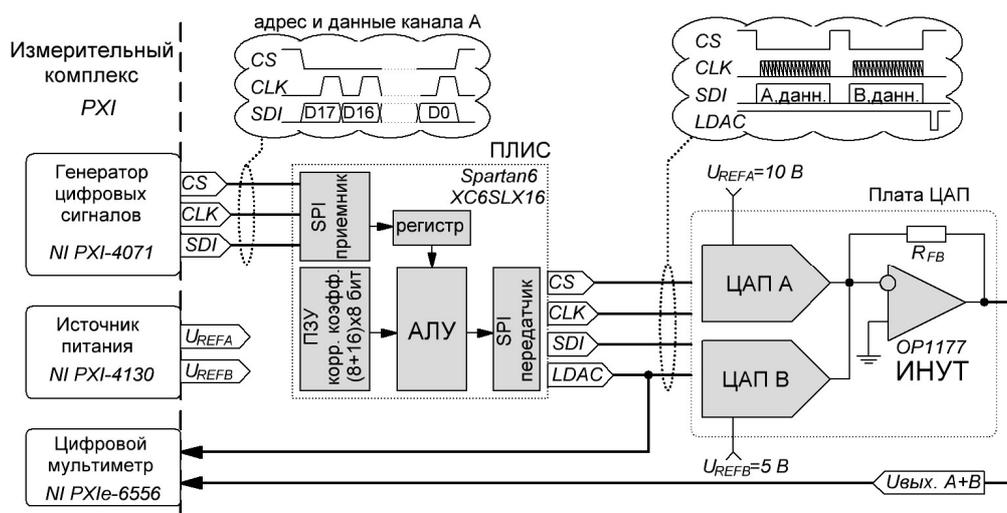


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

На рис. 3 и рис. 4 представлены графики исходных DNL и INL канала А. Эти характеристики были построены на основе измерений передаточной характеристики в 48 точках основных переходов с помощью метода суперпозиции. Данные характеристики были использованы для расчета корректирующих коэффициентов. Абсолютный максимум DNL основного ЦАП до калибровки составляет 13 EMP, абсолютный максимум INL равен 17 EMP.

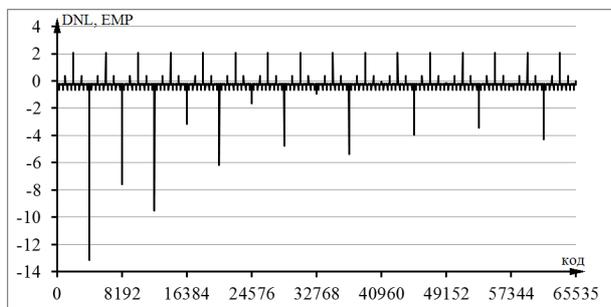


Рис. 3. DNL основного канала ЦАП без калибровки

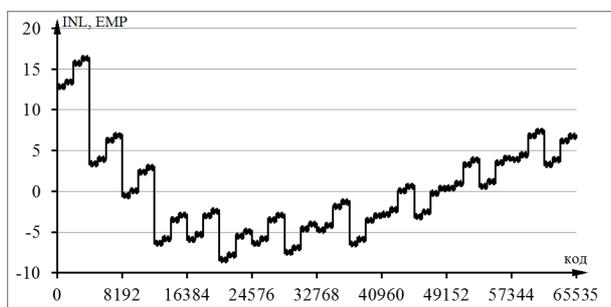


Рис. 4. INL основного канала ЦАП без калибровки

На рис. 5 и рис. 6 представлены графики DNL и INL корректирующего ЦАП в диапазоне кодов от 0 до 255. Нелинейности были приведены к значению EMP основного канала ЦАП. Абсолютное максимальное значение DNL не превышает 0,15 EMP_{ОСН}, абсолютный максимум INL не превышает 0,1 EMP_{ОСН}.

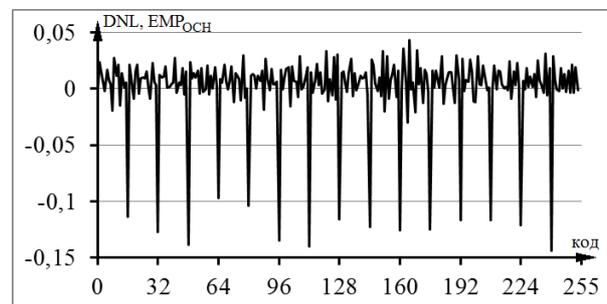


Рис. 5. DNL корректирующего канала ЦАП

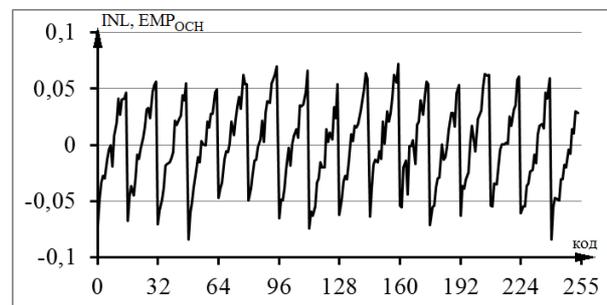


Рис. 6. INL корректирующего канала ЦАП

Графики DNL и INL основного ЦАП после калибровки представлены на рис. 7 и рис. 8. С помощью примененного алгоритма калибровки удалось уменьшить DNL и INL до абсо-

лютных значений 0,32 ЕМР и 0,8 ЕМР соответственно.

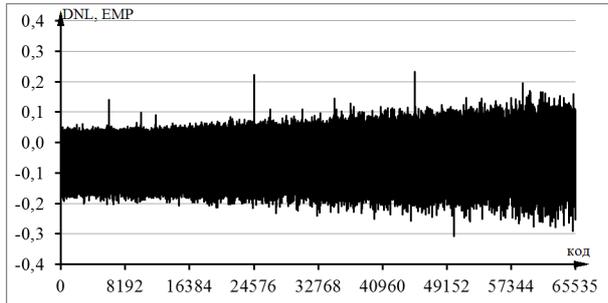


Рис. 7. DNL основного канала ЦАП после калибровки

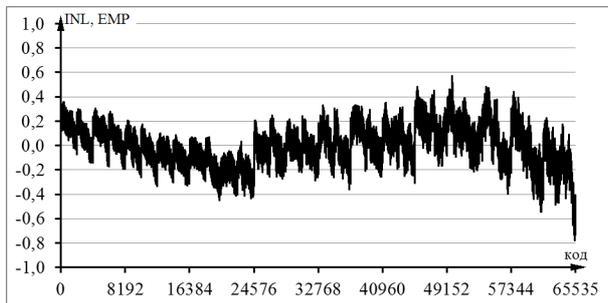


Рис. 8. INL основного канала ЦАП после калибровки

В результате калибровки нулевая точка передаточной характеристики сместилась на 0,5 ЕМР, а конечная точка - на 81,5 ЕМР, но оптимизация этих параметров выходит за рамки рассматриваемой задачи. Собственная нелинейность калибрующего канала не оказала существенного влияния на итоговую нелинейность основного канала ЦАП, так как при расчете коэффициентов были использованы фактические значения передаточной характеристики вспомогательного ЦАП.

Заключение

Предложенная система и алгоритм калибровки позволили уменьшить исходную интегральную нелинейность 16-разрядного ЦАП от 17 ЕМР до 0,8 ЕМР, а дифференциальную нелинейность - от 13 ЕМР до 0,32 ЕМР. Данный метод может быть применен в качестве альтернативы методам лазерной коррекции в тех случаях, когда погрешность смещения нуля и погрешность коэффициента усиления не являются критичными параметрами, а также есть технологическая возможность реализации блока энергонезависимой памяти.

Авторы видят дальнейший путь улучшения алгоритма калибровки в обеспечении стабильности параметров ЦАП в широком диапазоне температур. Это возможно путем добавления нескольких наборов корректирующих коэффициентов для разных диапазонов температур, датчика температуры и усовершенствованного АЛУ.

Литература

1. Zeng Tao, Chen Degang. New Calibration Technique for Current-Steering DACs // ISCAS. 2010. pp. 573-576.
2. Chen and R. Geiger A 16-bit resistor string DAC with full-calibration at final test / K. Parthasarathy, T. Kuyel, Zhongjun Yu, Degang // IEEE International Conference on Test, 2005. Austin, TX, USA, 2005, pp. 1-10.
3. Спецификация на микросхему цифро-аналогового преобразователя напряжения 5101HA015, K5101HA015, K5101HA015K. URL: <https://ic.milandr.ru/upload/iblock/b01/b01e9268a185522d9a6a1585b3183495.pdf> (дата обращения 11.03.2021).
4. Yuhua Liang, Zhangming Zhu, Ruixue Ding. Calibration algorithm for 16-bit voltage-mode R-2R DAC // Microelectronics Journal. 2015. Vol. 46. Issue 10. pp. 963-969.
5. Калиниченко С.В., Балашов Ю.С. Моделирование и исследование нелинейности сегментированного ЦАП // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем. 2018. Вып. 4. С. 70-75.

Поступила 07.03.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах

Калиниченко Станислав Витальевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); инженер-конструктор, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: kastos92@mail.ru, тел. +7(903)655-22-89

Балашов Юрий Степанович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: us_balashov@mail.ru, тел. +7(909)213-77-47

Харин Дмитрий Геннадьевич – ведущий инженер, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: rostovsky@niiet.ru, тел. +7(908)148-01-48

Шнайдер Александр Сергеевич – инженер, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), e-mail: alexscheider@hotmail.com, тел. +7(980)245-67-93

METHOD FOR NONLINEARITY MINIMIZATION OF MULTIPLYING DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER BY LOW RESOLUTION CALIBRATION CONVERTER

S.V. Kalinichenko^{1,2}, Yu.S. Balashov¹, D.G. Kharin², A.S. Shnaider²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²JSC Scientific Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russia

Abstract: in this paper, we present a method for nonlinearity minimization of precision multiplying digital-to-analog converter (DAC) by utilizing low resolution calibration DAC. In this method the calibration DAC generates distorted transfer characteristic which is added to the main DAC characteristic and provides resulting integral and differential nonlinearity reduction. The calibration coefficients are calculated following the presented algorithm and saved in nonvolatile memory and then are converted to controlling digital code of calibration DAC by arithmetical-logical unit (ALU) depending on input data. For experimental research we designed a model of calibration system based on field programmable gate array (FPGA) and a demo board with dual 16-bit segmented DAC. Then we give experimental results which show that inherent nonlinearity of calibration DAC does not significantly affect overall nonlinearity. The proposed calculation algorithm obtains effective integral and differential nonlinearity minimization of 16-bit DAC down to values of less than one least significant bit (LSB)

Key words: precision DAC, multiplying DAC, nonlinearity, calibration, FPGA

References

1. Zeng Tao, Chen Degang “New calibration technique for current-steering DACs”, *ISCAS*, 2010, pp. 573-576.
2. Parthasarathy K., Kuyel T., Zhongjun Yu., Degang Chen, Geiger R. “A 16-bit resistor string DAC with full-calibration at final test”, *IEEE International Conference on Test*, Austin, TX, USA, 2005, pp. 1-10.
3. “Voltage output digital to analog converter integrated circuit 5101NA015, K5101NA015, K5101NA015K specification”, available at: <https://ic.milandr.ru/upload/iblock/b01/b01e9268a185522d9a6a1585b3183495.pdf> (access date 11.03.2021).
4. Yuhua Liang, Zhangming Zhu, Ruixue Ding “Calibration algorithm for 16-bit voltage-mode R-2R DAC”, *Microelectronics Journal*, 2015, vol. 46, issue 10, pp. 963-969.
5. Kalinichenko S.V., Balashov Yu.S. “Modeling and nonlinearity research of the segmented DAC”, *Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development (Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nano-elektronnykh sistem)*, 2018, vol. 4, pp. 70-75.

Submitted 07.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Stanislav V. Kalinichenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); design engineer, JSC Scientific Research Institute of Electronic Technology (5 Sarykh Bol'shevikov str., Voronezh 394033, Russia), e-mail: kastos92@mail.ru, tel. +7(903)655-22-89

Yuriy S. Balashov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: us_balashov@mail.ru, tel. +7(909)213-77-47

Dmitriy G. Kharin, lead engineer, JSC Scientific Research Institute of Electronic Technology (5 Sarykh Bol'shevikov str., Voronezh 394033, Russia) e-mail: rostovsky@niiet.ru, tel. +7(908)148-01-48

Aleksandr S. Shnaider, engineer, JSC Scientific Research Institute of Electronic Technology (5 Sarykh Bol'shevikov str., Voronezh 394033, Russia), e mail: alexscheider@hotmail.com, tel. +7(980)245-67-93

ОБЗОР СПОСОБОВ ИНТЕГРАЦИИ АНТЕНН И СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ**С.М. Фёдоров, И.А. Черноиваненко, Е.А. Ищенко****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассматриваются методы проектирования для расширенной интеграции низкопрофильных антенн с солнечными системами для беспроводной связи малого радиуса действия. Необходимость перехода к более устойчивым источникам энергии возникает из-за чрезмерного производства вредных выбросов углерода. Основное внимание уделяется способам интеграции антенн и солнечных панелей из кристаллического кремния. Было предложено решение для минимизации чувствительности, которое использовалось для успешной изоляции микрополосковой линии передачи от солнечной решетки, что позволило продемонстрировать пять конфигураций антенн. Дальнейшая работа над кристаллическими солнечными панелями продемонстрировала их использование вместе с антеннами с круговой поляризацией для летательных аппаратов, а также позволила показать необходимость их использования совместно с Mesh-антеннами для небольших спутников. Солнечная дипольная антенна была разработана для использования внутри помещений с низким энергопотреблением. Эти подходы позволили создать инженерные возможности для уменьшения размера и веса устройства за счет интеграции технологий радио- и солнечных панелей. Представлены основные характеристики антенн для исследуемых случаев, произведено их сравнение, а также определено влияние на их параметры проводниковых материалов

Ключевые слова: диаграмма направленности, инвертированная F-антенна, антенна с круговой поляризацией, дипольная антенна, Mesh-антенна

Введение

Солнечная энергия становится привлекательной альтернативой для питания автономных систем связи. Эти устройства часто предполагают использование отдельных фотоэлектрических элементов и антенн, что требует компромисса в использовании ограниченного пространства.

Развитие технологий использования источников энергии необходимо для транспорта, например, для полета вокруг планеты на самолете, работающем на солнечной энергии.

Коммерческие полеты с использованием полностью электрических самолетов получают гораздо большее развитие благодаря замене механических, гидравлических и пневматических систем на электрические [1]. Растет интерес к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), снижение затрат на техническое обслуживание и увеличение дальности приводит к исследованиям БПЛА, работающих на солнечной энергии [2]. Восстановление энергии - это распространенный метод снижения эксплуатационных расходов транспортных средств.

Классификация видов интеграции антенн и солнечных панелей

Интеграция антенн с солнечными элементами обычно принимает одну из пяти

следующих форм:

1. Солнечный элемент расположен над излучающим элементом или над заземляющей плоскостью с некоторым пространством вокруг антенны для обеспечения возможности генерации излучения, при этом оставляется неиспользованная часть пространства.

2. Солнечный элемент используется в качестве опоры для металлической антенны, например, служит параболическим отражателем.

3. Солнечный элемент используется в качестве излучающего элемента антенны и металлической заземляющей плоскости, предназначенной для генерации электромагнитного поля.

4. Солнечный элемент используется в качестве заземления для металлической антенны.

5. Полностью интегрированная солнечная антенна, в которой солнечный элемент образует излучающий элемент; дополнительная металлизация для генерации излучения не требуется.

Подробно рассмотрим каждый вид интеграции.

Простейшая форма интеграции солнечных антенн заключается в совмещении в пространстве антенны и солнечного элемента для минимизации занимаемого пространства, то есть конструкция состоит из полностью металлической антенны и солнечных элементов, расположенных в некотором удалении от нее. Это сводит к

минимуму их взаимное влияние, обеспечивая функциональное разделение двух систем. Однако такая конструкция требует дополнительного пространства, а также дополнительных затрат на металлизацию антенны и заземления.

Совместное размещение копланарной волноводной инвертированной F-антенны (IFA) с солнечными элементами на основе a-Si [3] позволяет создать хорошую изоляцию для уменьшения взаимных помех. Антенна занимает 25% доступного солнечного пятна.

Антенны с круговой поляризацией используются вместе с солнечными элементами в космических устройствах [4]. В этом случае микрополосковые патч-антенны с круговой поляризацией, работающие на частоте 2,4 ГГц, были размещены в разных местах на миникосмическом корабле, чтобы определить наилучшую конфигурацию для обеспечения связи с наземными системами. Подобные конструкции требуют разнесенных площадей для антенн и солнечных элементов, а значит, спутник должен быть большим.

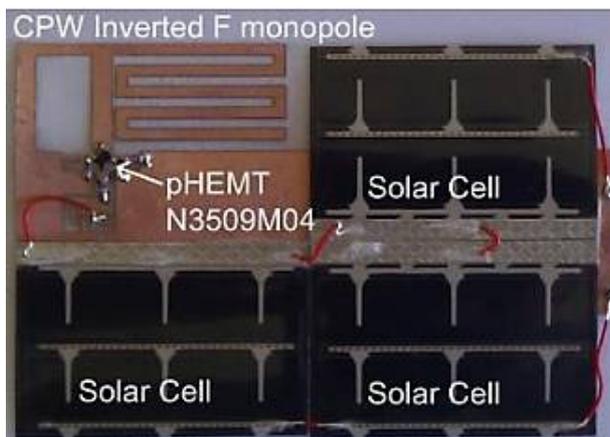


Рис. 1. Копланарная волноводная инвертированная F-антенна с a-Si панелью



Рис. 2. Патч-антенна с круговой поляризацией

Для ограничения размера тени предпочтительной является вертикальная интеграция антенны при минимальном затенении от солнца. Солнечная панель располагалась над щелевой антенной [5], излучающей через апертуру, которая уменьшала освещенную зону на 6,5%, однако высота рассматриваемой антенны составляла 25 мм. В аналогичной конструкции солнечная батарея размещалась над антенной с четырьмя щелями (высота антенны была 11,5 мм), обеспечивая всенаправленное покрытие с достаточными зазорами для излучения [6].



Рис. 3. 4-щелевая антенна

Так же как и совместное размещение антенны и солнечного элемента, использование принципа вспомогательной поддержки помогает свести к минимуму взаимодействие между системами путем их функциональной изоляции. В этой конфигурации антенна изготавливается из металла и функционирует без солнечных элементов. Солнечная батарея используется для улучшения работы антенны, например, как отражатель, фокусирующий луч антенны.

Поликристаллический кремниевый солнечный элемент может использоваться как плоскость заземления для микрополосковой линии передачи и служить отражателем для дипольной антенны из меди [7]. Исследования показали, что солнечный элемент генерирует ту же диаграмму направленности, что и идеальный электрический проводник, падение коэффициента усиления составляет всего 0,24 дБи.

Параболический отражатель, ламинированный заданным типом солнечных батарей, позволяет сформировать луч рупорной антенны на частоте 12 ГГц с уменьшением коэффициента усиления всего на 2,8 дБи по сравнению с обычным рефлектором. Рассматриваемая антенна реализует коэффициент усиления 31 дБи, но луч шириной 3° затрудняет поддержание радиочастотной связи.

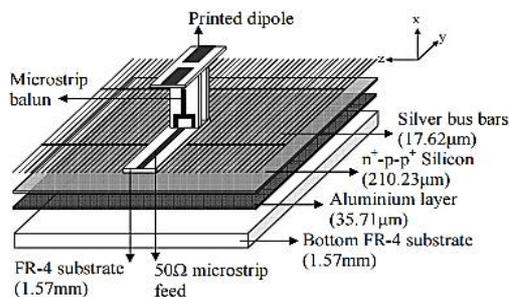


Рис. 4. c-Si отражатель

Известна конструкция антенны с круговой поляризацией, состоящая из четырех низкопрофильных печатных инвертированных F-антенн с заземляющей плоскостью из четырех мульткристаллических кремниевых солнечных панелей, подходящих для бортовой связи [8].

Квадратная плоскость заземления состоит из четырех ячеек кристаллического кремния, расположенных так, чтобы образовать пластину заземления шириной 322 мм над легкой опорой. Антенна использует катодный слой солнечных элементов в качестве заземляющего слоя. Для создания солнечной панели с выходной мощностью около 0,5 В и более 12 Вт используется медная полоска.

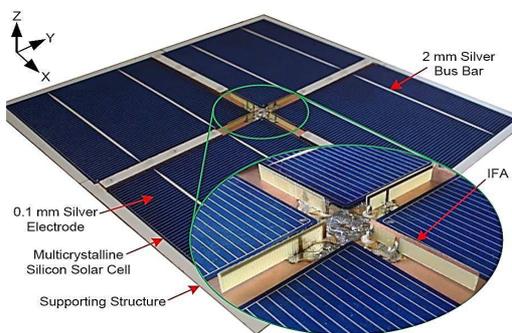


Рис. 5. Конфигурация солнечной антенны с круговой поляризацией

Измеренная ширина луча солнечной антенны по уровню 3 дБ составила 50° в плоскости XZ и 58° в плоскости YZ. Графики диаграмм направленности показаны на рис. 6.

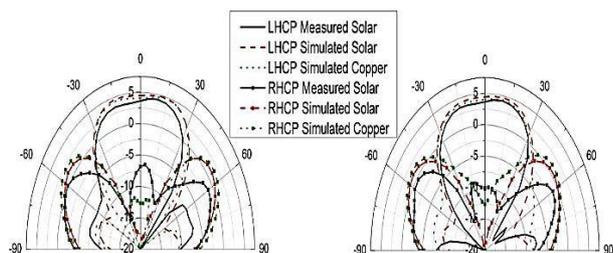


Рис. 6. Усиление круговой поляризации XZ (слева) и YZ (справа)

Существует конструкция высотой 8 мм, основанная на использовании поликристаллического солнечного элемента в качестве паразитного элемента [9] для достижения резонанса в четырех полосах частот со значениями коэффициента усиления от 2 до 4 дБи. Это позволяет реализовать облучение всей поверхности солнечного элемента, но требует значительного пространства для металлической антенны и плоскости заземления.

При использовании принципа «солнечный элемент работает как излучатель» достигается снижение общего веса устройства и уменьшение стоимости металлизации антенны. Однако в конструкции устройства по-прежнему необходима металлическая плоскость заземления для генерации излучения.

В [10] солнечный элемент из гидрированного аморфного кремния (a-Si:H) был выполнен в виде сверхширокополосной монополярной антенны с наклонным медным питанием для использования в качестве беспроводного датчика. Результаты моделирования показали, что в полосе 2–10 ГГц антенна обладает коэффициентом усиления 0–3 дБи. Среднее энергопотребление датчика составляло 29 мкВт, что позволяет поддерживать его работу в течение более чем 48 часов при использовании накопительного конденсатора емкостью 500 мФ. Схема сенсора и устройства питания встроены в заземление, сводя к минимуму ненужную металлизацию.

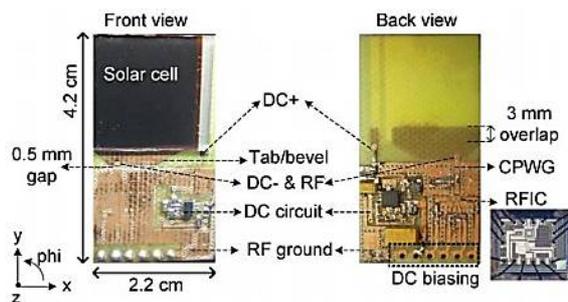


Рис. 7. a-Si монополярная антенна

Дальнейшее снижение затрат на производство может быть достигнуто за счет использования солнечного элемента в качестве плоскости заземления и интеграции металлического излучающего элемента с помощью значительно меньших затрат. Однако затенение антенной солнечного элемента отрицательно скажется на его выходной мощности, а структура солнечного элемента может затруднить согласование сопротивления.

Существует конструкция высотой всего 2 мм, построенная на основе патч-антенны, размещенной над поликристаллической солнечной ячейкой [11]. Наличие взаимного влияния солнечной решетки и антенны приводит к генерации более слабых электрических полей при ориентации линии передачи параллельно электродам, что показывает зависимость антенны от свойств солнечного элемента. Тень от антенны составляет значительную часть площади солнечного элемента, равную примерно 13%.

В [12] представлены солнечные элементы, соединенные с алюминиевой пластиной с помощью проводящей эпоксидной смолы для формирования плоскости заземления для mesh-антенны на прозрачной подложке. Исследования показали, что в таком устройстве сложно достичь хорошего согласования сопротивлений антенны и системы питания, проходящей через солнечный элемент и соединяющий плоскость заземления.

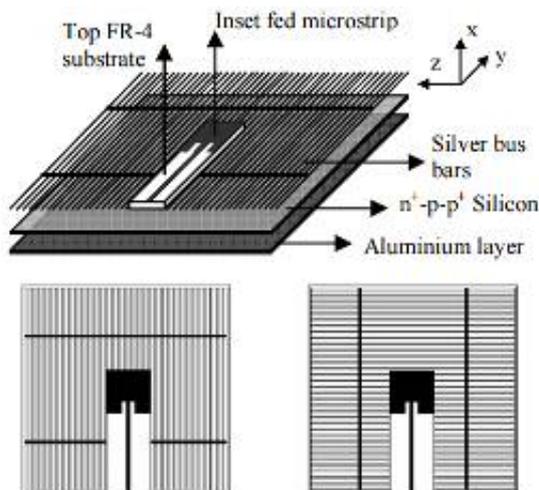


Рис. 8. Солнечная патч-антенна

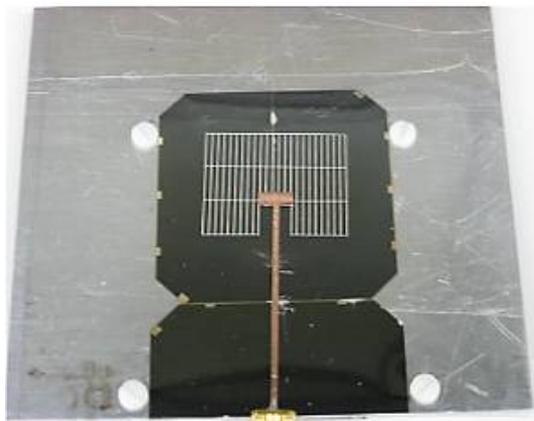


Рис. 9. Mesh-антенна

Идеальным вариантом интеграции было бы изготовление антенны и солнечного элемента в виде одной компактной системы с малым весом. Реализовать такую конструкцию легче всего с помощью менее эффективных типов солнечных элементов, так как изменение формы таких элементов требует меньше затрат. Существует компромиссное решение, связанное с удалением светочувствительного материала с целью генерации необходимого качества излучения. Это решение выглядит наиболее привлекательным из-за снижения веса и стоимости.

Известна конструкция, в которой солнечный концентратор использовался в качестве параболического рефлектора для увеличения коэффициента усиления антенны и выходной мощности солнечной энергии путем фокусировки света на четырех последовательно соединенных «emitter-wrap-through» (EWT) солнечных элементах для создания дипольной антенны, работающей на частоте 1,5 ГГц [13]. Выходное напряжение такой конструкции составляет 2,2 В (73,8 мВт). Этого хватает для питания датчика с низким энергопотреблением, но устройство в целом получается слишком большим для такой выходной мощности.

В [14] представлена конструкция сверхширокополосной дипольной антенны, состоящая из пары гидрированных a-Si солнечных батарей и запитываемая медными скосами. Рассматриваемая антенна работает на частоте 3–10 ГГц с пиковым коэффициентом усиления 3 дБи. Среднее потребление датчика составляет 55 мкВт, время работы 95 минут на накопительном конденсаторе емкостью 70 мФ.

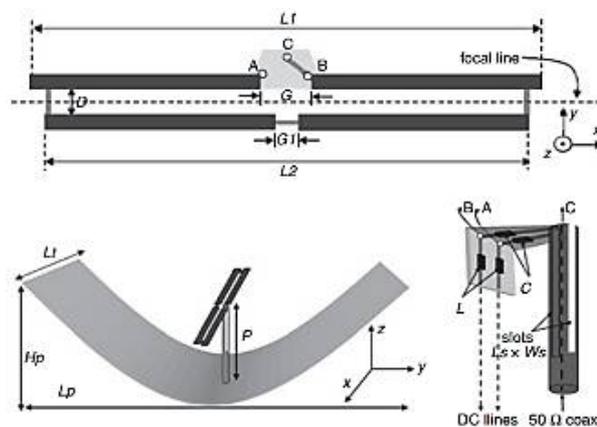


Рис. 10. EWT дипольная антенна

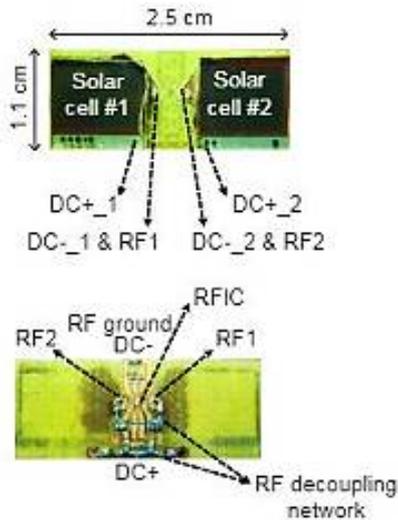


Рис. 11. a-Si дипольная антенна

Смоделированный и измеренный S_{11} -параметр дипольной антенны показан на рис. 12. Измеренные обратные потери превышают 10 дБ в диапазоне частот от 1,35 ГГц до 1,68 ГГц, что соответствует полосе частот с импедансом 21%. Измеренное усиление на средней частоте оказалось равным 11,1 дБ с небольшим изменением по всей полосе.

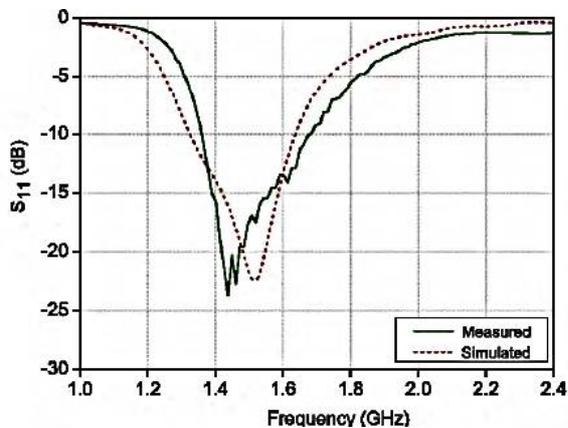


Рис. 12. Измеренный и смоделированный S_{11} -параметр для EWT дипольной антенны

Заключение

Из рассмотренных исследований видно, что совместное расположение антенны приводит к чрезмерно большой площади устройства, мешающей размещению обеих систем, и требует нанесения дополнительной металлизации. Поэтому такого метода интеграции следует избегать.

Хотя использование солнечных элементов или панелей как вспомогательных устройств

является достаточно успешной формой интеграции антенны, оно имеет ограниченные потенциальные возможности применения, поскольку высоко сфокусированные диаграммы направленности ограничивают возможности для солнечной оптимизации.

Использование солнечного элемента в качестве излучающего элемента антенны может свести к минимуму паразитное взаимодействие с конструкцией и материалом солнечного элемента, однако необходимость создания металлической плоскости заземления делает этот метод менее привлекательным.

Металлическая антенна над плоскостью заземления солнечного элемента является экономически эффективным способом интеграции, так как антенный элемент обычно не требует развитой металлизации, в то время как солнечный элемент уже имеет однородную металлическую область, пригодную для использования в качестве заземляющей плоскости. Размеры антенны в такой конструкции должны быть как можно меньше, чтобы уменьшить область тени и увеличить выработку электроэнергии.

Полностью интегрированные солнечные антенны являются идеальным решением, требующим только одного производственного цикла для изготовления как антенны, так и источника питания устройства. Главным направлением развития такой конструкции является максимизация использования пространства устройства путем минимизации апертур прорезей и использования различных типов солнечных элементов для разных приложений.

Литература

1. Stockholm Environment Institute, "The SEI Initiative on Fossil Fuels and Climate Change," 2015.
2. Solar Impulse, "Exploraton to change the world".
3. UHF Solar Powered Active Oscillator Antenna on Low Cost Flexible Substrate for Wireless Identification Applications / A. Georgiadis, A. Collado, S. Kim, H. Lee, M.M. Tentzeris // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 2012.
4. Maleszka T., Gorski P., Kabacik P. On Omnidirectional coverage with minimum nuber of circularly polarized patch antenna placed on minisatellites // Antennas and Propagation Society International Symposium. 2007. pp. 3037-3040
5. Huang M. Z. J. Antennas Integrated with Solar Arrays for Space Vehicle Applications // in 5th Intl Symp on Antennas Propag. & EM Theory, Beijing, China, 2000.
6. Wu T., Li R., Tentzeris M.M. A Scalable Solar Antenna for Autonomous Integrated Wireless Sensor Nodes // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2011. Vol. 10. Pp. 510-513.
7. A Microstrip Printed Dipole Solar Antenna using Polycrystalline Silicon Solar Cells / S.V. Shynu, M.J. Roos

Ons, G. Ruvio, M. J. Ammann, S. McCormack, B. Norton // IEEE AP-S International Symposium on Antenna and Propagation, 2008.

8. Circularly Polarized Solar Antenna for Airborne Communications Nodes / O. O'Conchubhair, A. Narbudowicz, P. McEvoy, M. J. Ammann // *Electronics Letters*. 2015. Vol. 51. No. 9. Pp. 667 – 669.

9. Yurduseven O., Smith D. A Solar Cell Stacked Multi-Slot Quad-Band PIFA for GSM, WLAN and WiMAX Networks // *IEEE Microwave & Wireless Component Letters*. 2013. Vol. 23. No. 6. Pp. 285 -287.

10. Danesh M., Long J.R. An Autonomous Wireless Sensor Node Incorporating a Solar Cell Antenna for Energy Harvesting // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2011. Vol. 59. Pp. 3546-3555.

11. On Surface Currents in a Polycrystalline Solar Cell Acting as Ground Plane for Microstrip Patch Antennas / M. J. Roo Ons, Shynu Nair, M. J. Ammann, S. McCormack, B. Norton // *IEEE International Antennas & Propagation Symposium*, San Diego, 2008.

12. Turpin T.W. Meshed Patch Antennas Integrated On Solar Cell -A Feasibility Study And Optimization // *Utah State University*, 2008.

13. Emitter-wrap-through photovoltaic dipole antenna with solar concentrator / S.V. Shynu, M.J. Ammann, S.J. McCormack, B. Norton // *Electronic Letters*. 2009. Vol. 45. No. 5. Pp. 241-242.

14. Danesh M., Long J.R. Solar cell antenna for autonomous wireless smart sensors // *Smart Systems Integration (SSI)*, Dresden, Germany, 2011.

Поступила 25.01.2021; принята к публикации 15.04.2021

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, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Чернованенко Игорь Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: chernovanenko2000@mail.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

OVERVIEW OF METHODS TO INTEGRATE ANTENNAS AND SOLAR CELLS

S.M. Fyedorov, I.A. Chernovanenko, E.A. Ishchenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers methods for advanced integration of low-profile antennas with solar systems for short-range wireless communications. The need to move to more sustainable energy sources arises from the excessive production of harmful carbon emissions. The focus is on the ways to integrate crystalline silicon antennas and solar panels. We proposed and used a solution to minimize sensitivity to successfully isolate the microstrip transmission line from the solar array, thus demonstrating five antenna configurations. Further work on crystalline solar panels demonstrated their use in conjunction with circularly polarized antennas for aircraft and it also allowed us to show the need for their use with Meshed Patch Antennas for small satellites. A solar dipole antenna was developed for low power indoor applications. These approaches created the engineering capability to reduce device size and weight by integrating radio and solar panel technologies. The article presents the main characteristics of antennas for the cases under study, compares them, and determines the effect of conductive material on their parameters

Key words: radiation pattern, inverted F-antenna, circularly polarized antenna, dipole antenna, Meshed patch antenna

References

1. "The SEI initiative on fossil fuels and climate change," Stockholm Environment Institute, 2015.
2. "Exploraton to change the world," Solar Impulse.
3. Georgiadis A., Collado A., Kim S., Lee H., Tentzeris M.M. "UHF solar powered active oscillator antenna on low-cost flexible substrate for wireless identification applications," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2012.
4. Maleszka T., Gorski P., Kabacik P. "On Omnidirectional coverage with minimum number of circularly polarized patch antenna placed on minisatellites," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2007, pp. 3037-3040
5. Huang M.Z.J. "Antennas integrated with solar arrays for space vehicle applications," *5th Intl Symp on Antennas Propag. & EM Theory*, China, Beijing, 2000.
6. Wu T., Li R., Tentzeris M.M. "A scalable solar antenna for autonomous integrated wireless sensor nodes," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, vol. 10, pp. 510-513.
7. Shynu S.V., Roos Ons M.J., Ruvio G., Ammann M.J., McCormack S., Norton B. "A microstrip printed dipole solar antenna using polycrystalline silicon solar cells," *IEEE AP-S International Symposium on Antenna and Propagation*, 2008.
8. O'Conchubhair O., Narbudowicz A., McEvoy P., Ammann M.J. "Circularly polarized solar antenna for airborne communications nodes" *Electronics Letters*, April 2015, vol. 51, no. 9, pp. 667-669.
9. Yurduseven O., Smith D. "A solar cell stacked multi-slot quad-band PIFA for GSM, WLAN and WiMAX networks," *IEEE Microwave & Wireless Component Letters*, 2013, vol. 23, no. 6, pp. 285-287.

10. Danesh M., Long J.R. "An autonomous wireless sensor node incorporating a solar cell antenna for energy harvesting," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, vol. 59, pp. 3546-3555.
11. Roo Ons M.J., Shynu Nair, Ammann M.J., McCormack S., Norton B. "On surface currents in a polycrystalline solar cell acting as ground plane for microstrip patch antennas," *IEEE International Antennas & Propagation Symposium*, San Diego, 2008.
12. Turpin T.W. "Meshed patch antennas integrated on solar cell -a feasibility study and optimization," Utah State University, 2008.
13. Shynu S.V., Ammann M.J., McCormack S.J., Norton B. "Emitter-wrap-through photovoltaic dipole antenna with solar concentrator," *Electronic Letters*, 2009, vol. 45, no. 5, pp. 241-242.
14. Danesh M., Long J.R. "Solar cell antenna for autonomous wireless smart sensors," *Smart Systems Integration (SSI)*, Germany, Dresden, 2011.

Submitted 25.01.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Igor A. Chernoiivanenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: chernoivanenko2000@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

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ В КОГНИТИВНЫХ РАДИОСЕТЯХ

Е.Е. Гринин¹, А.Б. Антиликаторов¹, О.В. Четкин², И.А. Новикова¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский институт МВД России, г. Воронеж, Россия

Аннотация: основной темой являются некоторые из алгоритмов сканирования радиоспектра и обнаружения сигналов в системе когнитивного радио, а также само когнитивное радио. Данная тема является актуальной, так как применение широкополосных каналов является одним из вариантов организации связи, но при этом возникают некоторые трудности. Например, из-за большого числа пользователей необходимо более рационально использовать спектр радиочастот. Рассматриваются основные аспекты обнаружения сигнала в узкополосных и широкополосных диапазонах. Рассказывается о недостатках адаптивных алгоритмов обнаружения, основанных на стандартных законах распределения. Приведены примеры как параметрических, так и непараметрических алгоритмов обнаружения. Подробно описывается алгоритм, основанный на критерии Уилкоксона. При помощи критерия Неймана-Пирсона можно сравнивать обнаружители между собой. Сделаны выводы о целесообразности применения для мониторинга радиоспектра непараметрических алгоритмов обнаружения. Для случая постоянного положительного сигнала на фоне гауссовской помехи сравнение значений асимптотической относительной эффективности для критерия Уилкоксона со значением линейного обнаружителя составляет порядка 0,955. Это значение говорит о том, что оба обнаружителя практически не уступают друг другу в таких условиях

Ключевые слова: когнитивное радио, радиопередача, алгоритмы обнаружения сигнала, широкополосный диапазон передачи

Введение

В наши дни наблюдается стремительное развитие радиосистем передачи данных. Вместе с развитием технологий также наблюдается рост требований к скорости передачи и объёму передаваемой информации. В сложившейся ситуации применение широкополосных каналов является одним из вариантов организации связи. При этом возникают новые трудности. Так, например, из-за большого числа пользователей необходимо более рационально использовать спектр радиочастот. В случае несоблюдения данного условия доступ к радиосвязи будет затруднён, а также может быть и вовсе не доступен.

Основными документами, регламентирующими распределение частотных полос для радиопередачи на территории Российской Федерации, являются соответствующие лицензии Государственного комитета по радиочастотам. Соответственно, выделенными лицензированными полосами могут пользоваться только те операторы, за которыми они определены. Современные мобильные телекоммуникационные системы способны работать в ограниченных полосах радиочастот. Эти полосы являют-

ся конечным ресурсом. Интересен тот факт, что использование лишь некоторой части радиоспектра для формирования полос радиовещания является эффективным подходом. Использование всей полосы радиочастот не даёт значимого эффекта, по сравнению с ситуацией частичного использования. J. Mitola в своих работах [1] предложил один из способов решения данной проблемы. Его подход заключался в применении такого радио, которое само подстраивало свои характеристики в зависимости от характеристик принимаемого сигнала.

Со временем такое радио получило название когнитивного радио. Когнитивное радио – некоторая система связи, которая с целью улучшения качества и возможностей радиовещания обладает такими качествами, как анализ окружающей обстановки и способность перестраиваться к её изменениям. Основным достоинством такой системы является тот факт, что обучение и изменение характеристик происходит в реальном времени. Такими характеристиками, способными изменяться, могут служить мощность радиопередатчика, способ модуляции сигнала и другие.

При работе КР использует автономный мониторинг спектра (МС). Такое «сканирование» спектра происходит по всему диапазону рабочих радиочастот, начиная от единиц мега-

герц и вплоть до нескольких гигагерц. Система определяет наличие свободных полос радиочастот для передачи сигнала. Динамическое использование частот при таком подходе позволяет подключить к сети огромное количество абонентов.

Постановка задачи

Еще одной отличительной особенностью системы радиосообщения, основанной на когнитивном радио, является полное отсутствие воздействия оператора на систему с целью изменения её параметров. Такая корректировка является автоматизированной. Ввиду чего требуется разработка таких методов и алгоритмов обнаружения радиопередачи, при которых неизвестные величины, характеризующие регистрируемый сигнал, не оказывали влияние на устойчивость приёма системы [2]. Помимо прочего, объем таких неизвестных данных может быть совсем малым, а в некоторых случаях вовсе отсутствовать.

Одним из способов преодоления такой непростой ситуации являются адаптивные алгоритмы обнаружения (АО). Наиболее популярными работами, посвящёнными данной проблематике, являются работы за авторством А.М. Рембовского и А.Б. Токарева [3]. Основанные на уже известных стандартных законах распределения (Гаусса, Райса и т.д. [3]) алгоритмы имеют существенный недостаток. Такие АО работают только при конкретном едином виде функции распределения сигнала, в случае изменения вида функции эффективность алгоритма заметно снижается.

Преодолеть ограничение алгоритмов обнаружения, основанных на стандартных законах распределения, пытались, используя алгоритмы с принципами инвариантности. Такой подход в литературе представлен работами специалистов: В.А. Богданович, М.Е. Шевченко, А.О. Чемаров [4]. Как отмечалось ранее, несмотря на преимущество перед адаптивными алгоритмами, у инвариантных АО присутствует весомый недостаток. Он заключается в том, что такие алгоритмы обнаружения применимы лишь к КВ диапазону. Такой недостаток ограничивает их повсеместное применение при использовании когнитивного радио.

Улучшить разработанные алгоритмы можно было, расширив их диапазон, сделав их широкополосными. Вопрос расширения диапазона инвариантных АО рассматривается в работах таких соотечественников, как Я.Д. Ширман, В.Г. Радзиевский, А.П. Дятлов [5], а

также среди иностранных авторов S. Haykin, D.J. Tomson, G. Xu, M. Wax [6]. В основе предложенных алгоритмов заложены несколько видов анализов. Прежде всего, вейвлет-анализа и корреляционного [7]. Помимо этих анализов, также применяется проверка сигнала на циклостационарность. Эти подходы обладают хорошей помехоустойчивостью, тем не менее, у них присутствуют свои недостатки. Как и у любого из представленных ранее подходов, у данного есть недостатки. Наиболее явным недостатком является величина вычислительных затрат на реализацию данного метода. Также невозможность заранее знать ширину полосы сигнала в каждом случае затрудняет реализацию данных АО.

В настоящее время трудно сказать о том, что применяется один подход к радиосвязи или же передаче данных. Обычно используют комбинацию сигналов как в узкой полосе пропускания, так и широкополосных. Помимо разницы в ширине диапазона сигнала, могут использоваться также и разные типы модуляции. Такое разнообразие вариантов сигналов приводит к тому, что единственным способом их обнаружения является такой подход, при котором используются непараметрические алгоритмы.

Модель наблюдаемых данных

Когда мы говорим про мониторинг радиоспектра, стоит понимать, что количество источников радиоизлучения априори не известно. Учитывая этот факт, будем считать, что одновременно в эфире звучат несколько радиосигналов, причём точное их количество не известно. Помимо самих радиосигналов в исследуемом спектре также присутствует так называемый белый шум. Он представляет собой некоторый сигнал, равномерно распределённый по всему диапазону задействованных частот. Так, чтобы облегчить представление этого процесса, отобразим его графически (рис. 1), а также обозначим его параметры общепринятыми обозначениями.

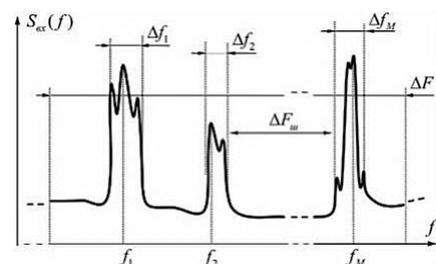


Рис. 1. Графическое представление наблюдаемого процесса

Так ΔF – ширина полосы частот, $\xi(t)$ – аддитивный нормальный белый шум с неизвестной интенсивностью σ^2 , M – число радиосигналов $S_m(t)$. Также установлено, что спектры этих сигналов имеют неизвестную заранее форму.

Также этот процесс можно представить как:

$$S_{\text{вх}}(t) = \xi(t) + \sum_{m=1}^M S_m(t, \Delta f_m). \quad (1)$$

Однако при таком подходе к решению задачи возникают трудности. Например, при попытке составить выборку отсчётов процесса столкнемся с тем фактом, что каждый отсчёт сложным образом зависит от всех сигналов, составляющих исследуемый радиоспектр.

Переход из временной в частотную область помогает несколько упростить выражение. В таком случае отсчёты энергетического спектра определяются по формуле 2 [2]:

$$X_R(n) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R |c_{(r)}(n)|^2 = \{x_n, n = \overline{1, N}\}, \quad (2)$$

Применив преобразование Фурье (ДПФ), усреднив таким образом выборку, можно добиться некоторого упрощения расчётов.

$$c_{(r)}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} S_{\text{вх}(r)}(k) e^{-j2\pi nk/N}, \quad (3)$$

где $r = \overline{1, R}$ – порядковый номер выборки; k и n – номера отсчетов во временной и спектральной областях соответственно;

T – интервал дискретизации;

N – размер выборки ДПФ.

Исходными данными является усреднённый энергетический спектр, рассчитанный ранее в формуле 2, состоящий из шума и нескольких радиосигналов $S_m(t)$. В свою очередь, сигналы будут представлены при помощи спектральных отсчётов:

$$dn_m = NTdf_m. \quad (4)$$

Подмножество таких спектральных отсчётов обозначим как θ_m . Такие отсчёты считаются независимыми случайными величинами, которые подчиняются нецентральному χ^2 распределению, это распределение является одним из вариантов распределения Пирсона [3], представленного в формуле 5:

$$W_{\text{нц}\chi^2}(x; \lambda, J, \delta) =$$

$$= \frac{1}{\lambda \Gamma(J/2)} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{J/2-1} e^{-(\delta + \frac{x}{\lambda})} {}_0F_1\left(\frac{J}{2}, \delta \frac{x}{\lambda}\right), \quad (5)$$

где ${}_0F_1(\alpha, z)$ – обобщенная гипергеометрическая функция;

$\Gamma(J)$ – гамма функция.

При этом параметры распределения находим по формуле 6:

$$\lambda = \frac{\sigma_\xi^2}{RN}, J = 2R, \delta = \frac{RN A_{mq}^2}{4\sigma_\xi^2} \quad (6)$$

где A_{mq} – амплитуда составляющей сигнала;

$q=n-n_m$ – порядковый номер отсчёта внутри спектра полезного сигнала.

Снизить дисперсию получаемых значений является возможным благодаря усреднению спектра по формуле 2.

Параметрические алгоритмы при мониторинге радиоспектра

Сложность определения сигнала при мониторинге спектра в КР заключается в неопределённости как значения параметров сигналов, так и законов, по которым они изменяются. Преодолеть данную сложность можно благодаря применению адаптивного метода. Суть данного метода заключается в замене неизвестных величин. В частности, метод заключается в том, что неизвестные величины заменяются на максимально правдоподобные оценки этих самых величин. На практике такой подход является ресурсоемким, что не позволяет добиваться высокого быстродействия системы КР. Ввиду чего, жертвуя некоторой долей точности, используют квазиоптимальные параметрические алгоритмы обнаружения сигнала. Один из таких алгоритмов представлен в работе Рембовского А.М. «Автоматизированный радиомониторинг на основе одноканальной и двухканальной обработки данных» [3] и будет рассмотрен далее.

Так как в полосе исследуемого радиоспектра присутствует не только полезный сигнал, но и шум, необходимо использовать также отсчёты шума этого спектра. Обычно, если говорят про шумы в некотором диапазоне, то подразумевают, что они распространяются по центральному χ^2 распределению, а также образуют своё подмножество «шумовых» отсчётов θ_w .

Ввиду того факта, что все отсчеты независимы относительно друг друга, можно прибегнуть к некоторой функции правдоподобия

для спектра (2). Сама же функция представлена в формуле 7:

$$W(x|\lambda) = \prod_{m=1}^M \left(\prod_{q=1}^{dn_m} W_{\text{нц}\chi^2}(x_{n_m+q}|A) \right) \prod_{n \in \theta_{\text{ш}}} W_{\chi^2}(x_n), \quad (7)$$

где $W_{\chi^2}(x_n)$ – центральное χ^2 распределение с параметрами $J=2R$, $a=0$, $\lambda = \frac{\sigma_{\xi}^2}{RN}$ [11];

$W_{\text{нц}\chi^2}(x_{n_m+q}|A_{mq})$ - нецентральное χ^2 распределение с параметрами (5).

Пороговая квазиоптимальная процедура делает возможным упрощение процедуры обнаружения сигнала с помощью замены глобальной максимизации функции правдоподобия, приведенной в формуле 7, разделением совокупности всех отсчётов на подмножество отсчетов шума и подмножества отсчетов сигналов. Такое деление основано на различии между законами распределения сигналов и отсчетов спектров шума. После применения данного метода расчет параметров сигналов следует производить для каждого параметра отдельно.

Отношение гипотезы о принадлежности отсчёта к спектру сигнала к гипотезе о его принадлежности к участку спектра, где нет полезных сигналов, вычисляется по формуле 8:

$$L(x_n) = \frac{W_{\text{нц}\chi^2}(x_n|A_{mq})}{W_{\chi^2}(x_n|A_{mq})} = \lambda^{1-R} e^{-\delta} {}_0F_1 \left(R, \delta \frac{x_n}{\lambda} \right) \quad (8)$$

где x_n – значение отсчёта,

A_{mq} – амплитуда на частоте n/NT .

При соблюдении условия $\delta > 0$ можно наблюдать то, что отношение правдоподобия растёт с увеличением значения отсчета x_n . Для оптимального разделения отсчёта $X_r(n)$ на подмножества шумов и полезного сигнала необходимо ввести пороговое значение $x_{\text{пор}}$. Тогда сравнивая значения отсчёта с пороговым значением, можно сделать вывод о его принадлежности к одному из множеств:

$$\begin{aligned} H_0: x_n < x_{\text{пор}} & - \text{сигнал отсутствует,} \\ H_1: x_n > x_{\text{пор}} & - \text{сигнал присутствует,} \end{aligned} \quad (9)$$

где H_1 - гипотеза о принадлежности отсчёта $X_R(n)$ спектру сигнала $S_m(t)$,

H_0 — гипотеза о принадлежности отсчёта спектру шумов.

Огромное влияние на показатели алго-

ритма оказывает правильный подбор значения $x_{\text{пор}}$. Подробно выбор этого параметра рассматривается в работе Рембовского А.М. «Радиомониторинг: задачи, методы, средства» [8].

Приведённый выше алгоритм возможно применять в реальном масштабе времени ввиду того, что он обладает относительно низкой вычислительной сложностью. Подход, применяемый в этом алгоритме, основан на том факте, что и сигнал, и шум подчиняются нормальному распределению. При отклонении сигнала или шума от нормального закона распределения вероятность обнаружения сигнала сильно снижается. Более того, данный АО будет эффективен только для относительно узкополосных сигналов.

Но несмотря на все ограничения, алгоритм широко применяется в комплексах мониторинга радиообстановки [8].

Непараметрические алгоритмы при мониторинге радиоспектра

Основным отличием и по совместительству преимуществом непараметрических алгоритмов по сравнению с параметрическими является тот факт, что непараметрические алгоритмы не производят оценок параметров распределения шума. Тот факт, что им не требуется адаптация под помехи, позволяет утверждать, что такие алгоритмы будут функционировать быстрее.

Согласно работе Бруханского «Непараметрические обнаружители сигналов» [9], можно сделать заключение о том, что более простыми в реализации являются непараметрические АО. Более того, в случае изменения вида распределения сигнала или же шума, они будут вести себя более устойчиво по сравнению с параметрическими алгоритмами.

В литературе, доступной широким массам, представлены лишь некоторые из непараметрических алгоритмов. Но среди остальных особо выделяется алгоритм на основе критерия Уилкоксона. Как и другие алгоритмы, он позволяет определить сигнал, имеющий симметричный вид функции распределения, на фоне шума, но является наиболее нетрудоёмким.

Непараметрический алгоритм на основе критерия Вилкоксона

Предположим, есть некоторая выборка отсчётов сигнала $X = \{x_1^*, x_2^* \dots x_n^*\}$. В таком случае задача обнаружения, выраженная через

гипотезы, выглядит как:

$$\begin{aligned} H_0: M = M_0 & - \text{сигнал отсутствует,} \\ H_1: M > M_0 & - \text{сигнал присутствует,} \end{aligned} \quad (10)$$

где M_0 – медиана распределения шума,

M – медиана распределения смеси сигнала с шумом.

Для проверки гипотезы

$H_0: M = M_0$ необходимо центрировать выборку $X = \{x_1^*, x_2^* \dots x_n^*\}$ по формуле 10:

$$x_i = x_i^* - M_0, i = \overline{1, N}. \quad (11)$$

Затем необходимо расположить полученные значения в порядке возрастания, причём положение отсчета сигнала x_i зависит только от его значения по модулю, знак не учитывается. Получаем новый ряд:

$$U = (U_1, U_2, \dots U_n), \quad (12)$$

где $U_1 = \min(|x_i|)$;

$U_n = \max(|x_i|)$;

$U_1 \leq U_2 \leq U_3 \leq \dots \leq U_n$.

Положение элемента x_i в ряду будет являться его рангом R_i^+ . Для дальнейшей работы со знаком значения необходимо ввести функцию единичного скачка, указанную в формуле 12:

$$\varphi_i = \begin{cases} 1, & x_i > 0 \\ 0, & x_i < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Далее необходимо вычислить статистику по формуле (14):

$$T^+ = \sum_{i=1}^n R_i^* \varphi_i \geq C_{\text{пор}}, \quad (14)$$

где Спор – заданный порог, который выбирается исходя из вероятности ошибки.

Данный способ обнаружения – алгоритм Уилкоксона [10].

Заключение

Проведя небольшой сравнительный анализ, можно сделать вывод о том, что для мониторинга радиоспектра используются как параметрические, так и непараметрические алгоритмы обнаружения. В свою очередь, параметрические АО уступают по характеристикам непараметрическим, так как те являются менее ресурсозатратными для вычислительной техники. Частным случаем непараметрических АО является алгоритм, основанный на критерии Уилкоксона.

Прибегнув к критерию Неймана-Пирсона, можно говорить о сравнении характеристик непараметрических обнаружителей. Также при помощи этого критерия можно сравнивать обнаружители между собой, так как для каждого из типов распределения шума предпочтительным является какой-то определённый. Сравнение происходит на основе коэффициента асимптотической относительной эффективности – АОЭ. Для случая постоянного положительного сигнала на фоне гауссовской помехи сравнение значений АОЭ для критерия Уилкоксона со значением линейного обнаружителя составляет порядка 0,955 [10]. Согласно этому значению оба обнаружителя практически не уступают друг другу в таких условиях.

Литература

1. Mitola J., Maguire G.Q. Cognitive radio: making software radios more personal // Personal Communications, IEEE. 1999. Vol. 6. P. 13-18.
2. Стоянов Д.Д. Анализ модифицированного непараметрического алгоритма обнаружения широкополосных радиосигналов // Технические науки: теоретические и прикладные аспекты: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: Научный Центр «Аэтерна», 2014. С. 52-56.
3. Рембовский А.М., Токарев А.Б., Автоматизированный радиомониторинг на основе одноканальной и двухканальной обработки данных // Вестник МГТУ. 2004. №3(56). С. 42-62.
4. Шевченко М.Е., Чемаров А.О. Обнаружение и оценивание параметров источников радиоизлучения в широкой полосе обзора. СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 136 с.
5. Радзиевский В.Г., Сирота А.А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. М.: Радиотехника, 2004. 432 с.
6. Haykin S., Tomson D.J., Reed J.H. Spectrum Sensing for Cognitive Radio // Proceedings of the IEEE. 2009. Vol. 97. No. 5. pp. 849-877.
7. Хмелев С.Л., Трушков А.О. Обнаружение сигналов в широком частотном диапазоне на основе вейвлет-преобразования от спектральной плотности мощности // Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2014: докл. 16-й междунар. конф. М.: ООО "Издательский дом Медиа паблишер", 2014. Т. 1. С. 726-730.
8. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг: задачи, методы, средства. М.: Горячая линия – Телеком, 2010. 640 с.
9. Непараметрические обнаружители сигналов: учеб. пособие к лабораторной работе / сост. А.В. Бруханский. М.: Кафедра 401 МАИ, 1998. 21 с.
10. Обнаружение радиосигналов / П.С. Акимов, Ф.Ф. Евстратов, С.И. Захаров и др.; под ред. А.А. Колодова. М.: Радио и связь, 1989. 287 с.

Гринин Егор Евгеньевич – студент 2-го курса магистратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: GrininEE@gmail.com

Антиликаторов Александр Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: antilikatorov63@mail.ru

Четкин Олег Викторович – старший преподаватель кафедры радиотехники и электроники, Воронежский институт МВД России (394065, Россия, г. Воронеж, просп. Патриотов, 53), e-mail: olegnetpro@rambler.ru

Новикова Ирина Анатольевна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: irina_novikova28@list.ru

RESEARCH OF SIGNAL DETECTION ALGORITHMS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

E.E. Grinin¹, A.B. Antilikatorov¹, O.V. Chetkin², I.A. Novikova¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses some of the algorithms for scanning the radio spectrum and detecting signals in the cognitive radio system, as well as the cognitive radio itself. This topic is relevant since the use of broadband channels is one of the options for organizing communication. Due to a large number of users, it is necessary to more rationally use the radio frequency spectrum. We considered the main aspects of the detection of the signal in narrowband and broadband bands. We described the lack of adaptive detection algorithms based on the standard distribution laws. We give examples of both parametric and non-parametric detection algorithms. We described the algorithm based on Wilcoxon's criteria in detail. Using the Neuman-Pearson's criterion, you can compare the detectors among themselves. We made conclusions about the feasibility of application for monitoring the radiospectrum of non-parametric detection algorithms. For the case of a constant positive signal against the background of Gaussian interference, comparing the values of asymptotic relative efficiency for the Wilcoxon's criterion with the value of the linear detector is about 0.955. This value suggests that both detectors are practically inferior to each other in such conditions

Key words: cognitive radio, radio transmission, signal detection algorithms, wide range transmission

References

1. Mitola J., Maguire G.Q. "Cognitive radio: making software radios more personal", *Personal Communications, IEEE*, 1999, vol. 6, pp. 13-18.
2. Stoyanov D.D. "Analysis of a modified nonparametric algorithm for detecting broadband radio signals", *Proc. of the International Scientific and Practical Conf.: Technical Sciences: Theoretical and Applied Aspects (Tekhnicheskie nauki: teoreticheskie i prikladnye aspekty: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Ufa, 2014, pp. 52-56.
3. Rembovskiy A.M., Tokarev A.B. "Automated radio monitoring based on single-channel and two-channel data processing", *Bulletin of MSTU (Vestnik MGTU)*, 2004, no. 3(56), pp. 42-62.
4. Shevchenko M.E., Chemarov A.O. "Detection and estimation of parameters of radio sources in a wide field of view" ("Obnaruzhenie i otsenivanie parametrov istochnikov radioizlucheniya v shirokoy polose obzora"), St. Petersburg, Publishing House of SPbGETU "LETI", 2010, 136 p.
5. Radzievskiy V.G., Sirota A.A. "Theoretical foundations of radioelectronic intelligence" ("Teoreticheskie osnovy radioelektronnoy razvedki"), Moscow, Radiotekhnika, 2004, 432 p.
6. Haykin S., Tomson D.J., Reed J.H. "Spectrum Sensing for Cognitive Radio", *Proc. of the IEEE*, May 2009, vol. 97, no. 5, pp. 849-877.
7. Khmelev S.L., Trushkov A.O. "Detection of signals in a wide frequency range based on the wavelet transform from the spectral power density", *Proc. of the 16th International Conf.: Digital Signal Processing and its Application-DSPA-2014 (Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye – DSPA-2014: dokl. 16-oy mezhdunar. konf.)*, Moscow, 2014, vol. 1, pp. 726-730.
8. Rembovskiy A.M., Ashikhmin A.V., Koz'min V.A. "Radiomonitoring: tasks, methods, means" ("Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva"), Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom, 2010, 640 p.
9. Brukhanskiy A.V. comp. "Nonparametric signal detectors: a textbook for laboratory work" ("Neparametricheskie obnaruzhiteli signalov: ucheb. posobie k laboratornoy rabote"), Department 401 of MAI, 1998, 21 p.
10. Akimov P.S., Evstratov F.F., Zakharov S.I. et al., ed. Kolosov A.A. "Detection of radio signals" ("Obnaruzhenie radioisignalov"), Moscow, Radio I Svyaz', 1989, 287 p.

Submitted 19.02.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Egor E. Grinin, Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: GrininEE@mail.ru

Aleksandr B. Antilikatorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: antilikatorov63@mail.ru

Oleg V. Chetkin, Assistant Professor, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov prosp., Voronezh 394065, Russia), e-mail: olegnetpro@rambler.ru

Irina A. Novikova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: irina_novikova28@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РОСТА И РАСТВОРЕНИЯ ОКСИДНОЙ ФАЗЫ НА ТИТАНЕ В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА ПРИ ЕГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКЕ

И.Л. Батаронов, В.В. Пешков, В.Ф. Селиванов, В.В. Шурупов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: получение прочных диффузионно-сварных соединений поверхностно активных металлов связано с ростом и растворением оксидных пленок на контактных поверхностях. При этом процесс образования оксидов может протекать по различным механизмам. При высокотемпературном нагреве титановых сплавов при диффузионной сварке, реализуемой в вакууме, имеет место активное взаимодействие металла с остаточными газами вакуумированного пространства. Образующиеся оксидные пленки препятствуют физическому контакту и дальнейшему развитию качественного неразъемного соединения деталей. Ввиду быстротечности роста и растворения оксидов на соединяемых поверхностях и невозможности в динамике количественно оценить их величину предложено физико-математическое моделирование процесса роста и растворения оксидов, позволяющее определить время и температуру нагрева поверхностей, при которых возможно приложение сварочного давления к контактным поверхностям, свободным от оксидов. Построенные на основе полученных математических выражений графики позволяют определить характер изменения толщины оксидной пленки. На основании анализа графических зависимостей установлено, что уменьшение толщины оксидов, вплоть до их практически окончательного удаления, зависит от скорости нагрева. При большей скорости нарастания температуры образуется меньший слой оксидов. Такая же ситуация прослеживается при увеличении степени вакуумирования в герметичной камере. Для практических задач установленные математические и графические данные позволяют определить технологические схемы и условия, при которых становится возможным сведение в контакт соединяемых поверхностей деталей из титана, когда их поверхности деблокированы от оксидов, что, в свою очередь, определяет качество и надежность диффузионно-сварного соединения

Ключевые слова: диффузионно-сварное соединение, оксидная пленка, скорость нагрева, взаимодействие, контактные поверхности, математическая модель

Введение

Современной тенденцией промышленного производства является расширение номенклатуры и создание новых технологий производства изделий из титановых сплавов.

Одной из важнейших задач при изготовлении таких изделий является совершенствование способов получения неразъемного соединения, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики, сохраняя при этом точные геометрические размеры получаемых конструкций.

Перспективным процессом получения неразъемного соединения прецизионных изделий из титана и его сплавов является диффузионная сварка. Процесс получения качественного диффузионно-сварного соединения предполагает нагрев и приложение сжимающего усилия. При этом с учетом высокого химического сродства с кислородом в процессе нагрева на соединяемых поверхностях происходит образование оксидов, препятствующих формированию качественного соединения.

При анализе процессов химико-термической обработки, диффузионной сварки, других видов высокотемпературной обработки материалов возникают задачи, связанные с определением кинетики фазовых превращений в поверхностном слое материала в результате взаимодействия с газовой фазой. Кинетика таких превращений может регистрироваться по изменению толщины слоя новой фазы во времени.

Постановка задачи

В процессе нагрева при высокотемпературной обработке титана, в частности, при диффузионной сварке, происходит не только рост оксидной пленки на соединяемых поверхностях, но и ее растворение в металлической основе. Протекание данного процесса является быстротечным во времени. Поэтому оценить кинетику процесса прямыми измерениями толщины оксидов не представляется возможным.

Задача экспериментального изучения влияния, например, скорости нагрева, а также температуры на характер изменения толщины оксидной пленки осложняется тем, что прямым измерениям предшествует не только нагрев, но

и охлаждение образцов. Соответственно величина пленки также изменяется как при нагреве, так и при охлаждении. Данное обстоятельство существенно влияет на точность прямых измерений. Кроме того, отсутствует техническая возможность в условиях эксперимента применить оборудование, позволяющее практически мгновенное измерение толщины оксида в технологическом диапазоне заданных температур.

На основании вышеприведенных факторов принято решение о моделировании процесса роста и растворения оксидной фазы на титане в условиях нагрева и дальнейшем сравнении полученных зависимостей с косвенными экспериментальными данными.

Метод исследования

При высокотемпературном нагреве титана и его сплавов, например при диффузионной сварке в камере с разрежением до 10^{-3} Па, развиваются процессы активного взаимодействия металла с газами остаточной атмосферы. Как показывает термодинамический анализ, из всех реакций взаимодействия титана с компонентами остаточного газа реакция взаимодействия с кислородом:



является наиболее вероятной. При этом взаимодействие титана с кислородом включает в себя два одновременно протекающих процесса: образование оксидных пленок и растворение кислорода в металлической основе [1].

Таким образом, основным фазовым превращением при высокотемпературной обработке титана является образование и растворение на его поверхности оксидов. Практически в условиях эксперимента определить механизм роста и растворения оксидов затруднено ввиду быстротечности процесса. Поэтому оптимальным подходом к решению этой задачи является моделирование процесса взаимодействия титана с кислородом в сочетании с экспериментальными исследованиями.

Для оценки процесса изменения толщины оксида целесообразным является применение математического моделирования, предполагая, что его рост и растворение происходит по диффузионному механизму в системе: «газовая среда – оксид – металл».

Рассматривая постановку задачи как диффузионную в фазе оксида, принимая при этом равновесную концентрацию C_i в пограничном разделе фаз диффундирующего кислорода, ко-

торую с учетом диаграммы фазового равновесия можно представить в двух фазах: оксидной по выражению (2) и металлической матрице по выражению (3).

$$\begin{aligned} dC / dt &= D_1 \cdot [d^2 C / dX^2]; & C(0, t) &= C_0; \\ C(Y, t) &= C_1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} dC / dt &= D_2 \cdot [d^2 C / dX^2]; & C(Y, t) &= C_2; \\ C(\infty, t) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Баланс потоков J_I и J_{II} на границе раздела фазы 1 и фазы 2 описывается выражением:

$$J_I + J_{II} = (C_1 - C_2) \cdot Y, \quad (4)$$

где Y – координата границы раздела фаз, которая считается равной толщине оксидной пленки;

t – время взаимодействия;

C_1 и C_2 – концентрации на границах раздела фаз;

D_1 и D_2 – коэффициенты диффузии кислорода в оксиде и титане соответственно.

Решая (2) и (3) с помощью метода тепловых потенциалов [2], после ряда преобразований получим приближенные выражения для потоков:

$$\begin{aligned} J_{II} &= - D_2 \cdot C_2 / (\pi t)^{-1/2} = \\ &= - D_2 \cdot C_2 / (\pi \int_0^t D_2(t') dt')^{-1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

Необходимо отметить, что в данном приближении правая часть выражения (4) $C_2 Y$ является величиной более высокого порядка малости, чем величина второго потока J_{II} . Поэтому данной величиной можно пренебречь. Кроме того, выражение (5) может быть использовано и в случае, когда имеется незначительное изменение концентрации второго потока C_2 .

Для первого потока J_I будет справедливым выражение при условии, что $C_0 - C_1 \ll C_1$:

$$J_I = D_1 (C_0 - C_1) / Y \quad (6)$$

В частности, вышеприведенное выражение будет выполнимо даже при медленном изменении концентраций C_0 и C_1 .

С учетом (5) и (6) условие баланса потоков (4) принимает вид нелинейного дифференциального уравнения для величины $Y(t)$:

$$\begin{aligned} C_1 \cdot Y &= [D_1 \cdot (C_0 - C_1) / Y] - [D_2 \cdot C_2 \cdot (\pi \int_0^t D_2(t') \\ & dt')^{-1/2}] \end{aligned} \quad (7)$$

Данное уравнение легко решается в случае $D_i = \text{const}$ или $D_1 = D_2$. Выполненные для контроля модельные численные решения рассматриваемой задачи с нестационарными условиями также показали хорошее согласие с решением уравнения (7) в этих случаях.

Для придания выражению (7) более удобного для практического использования вида вместо параметров D_i и C_i используем с целью характеристики процесса роста и растворения оксидов при установленных значениях величины остаточного давления кислорода в вакуумированном пространстве, целесообразным представляется использование констант роста K_1 (Т, Р) и растворения K_0 (Т) при постоянной температуре [3]. Тогда уравнение (7) после ряда преобразований с учетом кинетики адсорбционных процессов запишется в виде:

$$d/dt \left(y + \sqrt{\int_0^t K_0 dt'} \right) = \frac{2K_2}{1 + \sqrt{1 + 16 \left(\frac{K_2}{K} \right)^2 + Y^2}}, \quad (8)$$

где величина K_2 – константа роста так называемого кинетического режима окисления [4]. Предполагаемая в (8) зависимость величин K_i от времени t обусловлена зависимостью от t температуры T . Отсюда в пределе $K_1 \rightarrow \infty$ и пренебрежении диффузией в матрице ($K_0 \rightarrow 0$)

получим уравнение вида $\dot{Y} = K_2$, соответственно, в другом пределе $K_2 \rightarrow \infty$ и уравнение (8) переходит в (7). Таким образом, полученное уравнение (8) описывает диффузионно-кинетический режим фазового превращения с учетом растворения.

Рассмотрим теперь решение уравнения (8) в условиях возрастания температуры. В первом приближении будем считать, что температура возрастает равномерно согласно линейному закону роста: $T = T_0 + \dot{T}t$ (\dot{T} – скорость изменения температуры). Тогда для нестационарных температурных условий решение нетрудно получить, если разбить весь интервал изменения температуры на две области: низкотемпературную, в которой можно пренебречь растворением оксидной фазы в матрице ($K_0 \approx 0$), и высокотемпературную с интенсивным растворением, в которой можно пренебречь ростом оксидной фазы по сравнению с диффузионным потоком в матрицу [1].

Тогда с учетом аррениусовской зависимости констант K_i от температуры получим для

низкотемпературной и высокотемпературной областей соответственно:

$$y^2 \cong \frac{RTK_1}{\dot{T}E_1} \left(1 - \frac{E_1 \cdot \sqrt{\dot{T} \cdot E_1 \cdot K_1 / R}}{(3E_1 - 2E_2) \cdot 2TK_2} \right) \quad (9)$$

и

$$y^2 \cong \frac{RT^2 \cdot K_1^2}{\dot{T} \cdot E_0 \cdot K_0} \left(1 - \frac{\sqrt{\dot{T} \cdot E_0 \cdot K_0 / R}}{2 \cdot T \cdot K_2} \right). \quad (10)$$

Здесь R – универсальная газовая постоянная; E_1 , E_2 и E_0 – энергии активации роста в диффузионном и кинетическом режимах и растворения оксидной фазы соответственно.

Анализ полученных зависимостей показывает, что в низкотемпературной области рост температуры сопровождается монотонным увеличением толщины оксидного слоя, тогда как в высокотемпературной области при некоторых условиях (соотношение $E_0 > 2E_2$) возможно растворение оксидной фазы.

С достаточной для практики точностью уравнение (8) можно представить в виде:

$$\frac{d}{dt} \left(y + \sqrt{\int_0^t K_0 dt'} \right) = \frac{K_1 \cdot K_2}{K_1 + 2K_2 \cdot Y}. \quad (11)$$

С достаточной степенью точности в пределе $K_1 \rightarrow \infty$ для толщины оксидной фазы из выражения (11) нетрудно получить:

$$y \cong \frac{T^2 \cdot K_2(T, P)}{E_2 \cdot \dot{T}} - \sqrt{\frac{T^2 \cdot K_0(T)}{E_0 \cdot \dot{T}}}. \quad (12)$$

Для применения на практике вышеприведенных зависимостей необходимо определить энергии активации E_i и константы K_i .

С целью количественной оценки значений указанных параметров исследовался процесс образования оксидов на технически чистом титане ВТ1-0 в диапазоне температурного интервала 500 – 600 °С. Рост оксидных пленок изучали при парциальном давлении остаточного кислорода $3 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}$ Па. Установленная степень разрежения обеспечивалась эвакуированием объема герметичной камеры с помощью механического и паромасляного насосов.

Образцы предварительно окисляли до образования оксида толщиной порядка 50 нм. Далее производился их вакуумный отжиг при $T = 550 \pm 10$ °С. Рост оксидных пленок изучали

при парциальном давлении остаточного кислорода $3 \times 10^{-3} - 10^{-4}$ Па.

Толщина оксида оценивалась значением отличия ранее полученной исходной величины от имеющейся после нагрева.

Количественно толщина оксида определялась с помощью эллипсометра Э-1.

Обработка полученных экспериментальных данных позволила определить степенную зависимость роста оксидов с течением времени. Показатель степени при этом имеет значения от 1,5 до 1,63. Данное обстоятельство свидетельствует о диффузионно-кинетическом характере окисления [4, 5, 6]. В этом случае процесс роста оксидов может быть выражен уравнением Эванса [7]:

$$K_2 \cdot y^2 + K_1 \cdot y = K_1 \cdot K_2 \cdot t, \quad (13)$$

где $K_2(P_0, T)$ и $K_1(P_0, T)$ – константы роста в кинетическом и диффузионном режимах соответственно.

Дальнейшая обработка данных позволила определить величины энергий активации процесса роста оксидных пленок, равные 38 КДж и 69 КДж в кинетическом и диффузионном режимах соответственно. В результате были получены зависимости, описывающие оценку констант скорости образования оксидов:

$$K_1 = 2,98 \cdot 10^4 \cdot P_0^{0,08} \cdot \exp(-69000/RT), \quad (14)$$

$$K_2 = 1,8 \cdot 10^4 \cdot P_0 \cdot \exp(-38000/RT), \quad (15)$$

где P_0 – парциальное давление кислорода в газовой среде.

Обработка экспериментальных данных по растворению оксидных пленок показала, что процесс можно описать выражением:

$$K_0 = K_0' \exp(E_0/RT) = 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot \exp(-247000/RT), \quad (16)$$

где $K_0' = 4,8 \cdot 10^{14}$ – предэкспоненциальный множитель, а $E_0 = 247$ КДж – энергия активации процесса растворения.

Определение констант K_i позволяет использовать полученные выражения (9), (10) и (12) для построения кривых изменения толщины оксидной пленки в процессе нагрева с заданной скоростью \dot{T} .

Построенные на основании полученных математических выражений графические зависимости определяют изменение толщины оксидов с течением времени (рис. 1) и изменением температуры (рис. 2).

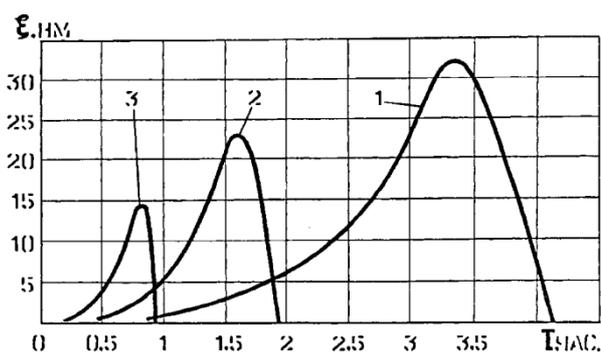


Рис. 1. Изменение толщины оксидной пленки в соответствии с течением времени. Скорость нагрева T , К/с: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,2. Разрежение в камере $1 \cdot 10^{-3}$ Па

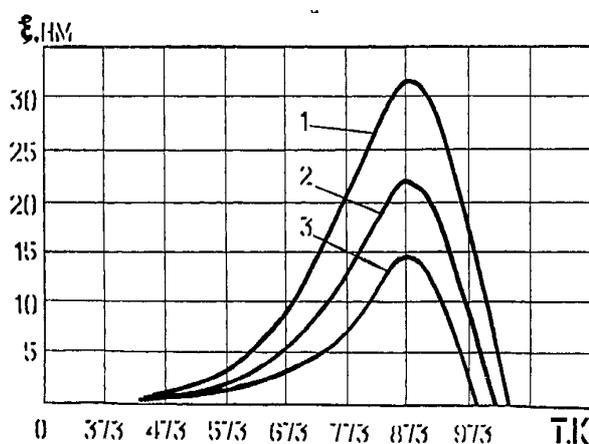


Рис. 2. Характер изменения толщины оксида в зависимости от температуры. Скорость нагрева T , К/с: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,2. Остаточное разрежение в камере $1 \cdot 10^{-3}$ Па

Выводы

1. Разработана физико-математическая модель процесса изменения оксидных пленок на титане в условиях нестационарной температуры.

2. На основании разработанной модели дан анализ влияния скорости нагрева (при линейном законе изменения температуры) и парциального давления кислорода на толщину образующихся оксидов.

3. Установлено, что увеличение скорости нагрева титановых заготовок и понижение парциального давления кислорода в рабочей камере приводит к уменьшению толщины образовавшейся оксидной фазы и снижению температуры деблокирования оксидами поверхности.

4. Установлено, что создание условий нагрева титановых заготовок, при которых происходит деблокирование контактных поверхностей оксидами до начала образования физического взаимодействия, позволяет обес-

печить прочное диффузионно-сварное соединение.

Литература

1. Шурупов В.В. Исследование и разработка процесса диффузионной сварки титановых пористых и компактных заготовок. Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1997. 168 с.
2. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 134 с.
3. Безокислительный нагрев редких металлов и сплавов в вакууме/ Б.Л. Линецкий, А.В. Крупин, Б.К. Опара, А.Г. Ракоч. М.: Metallurgiya, 1985. 183 с.

4. Окисление титана и его сплавов/ А.С. Бай, Д.И. Лайнер, Е.Н. Слесарева, М.И. Ципин. М.: Metallurgiya, 1970. 317 с.
5. Эванс Ю.Р. Коррозия и окисление металлов; пер. с англ. М.: Машгиз, 1962. 856 с.
6. Жук И.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Metallurgiya, 1976. 473 с.
7. Пешков В.В., Родионов В.Н., Подоприхин М.Н. Ползучесть титанового сплава ОТ4 с крупнозернистой структурой//Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. 1980. №5. С. 95-97.

Поступила 10.03.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах

Батаронов Игорь Леонидович - д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой высшей математики и физико-математического моделирования, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vmfmm@mail.ru, тел. (473)246-42-22

Пешков Владимир Владимирович - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kaf-tspd@yandex.ru, тел. (473)278-38-84

Селиванов Владимир Федорович - д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vf_selivanov@mail.ru, тел. (473)278-38-84

Шурупов Владимир Викторович - доцент, доцент кафедры технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: shurupov.svarka@yandex.ru, тел. (473)278-38-84

INVESTIGATION OF THE GROWTH AND DISSOLUTION OF THE OXIDE PHASE ON TITANIUM WHEN HEATING DURING ITS HIGH-TEMPERATURE TREATMENT

I.L. Bataronov, V.V. Peshkov, V.F. Selivanov, V.V. Shurupov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the production of strong diffusion-welded joints of surfactants is associated with the growth and dissolution of oxide films on the contact surfaces. In this case, the process of formation of oxides can proceed by various mechanisms. At high-temperature heating of titanium alloys during diffusion welding, implemented in a vacuum, there is an active interaction of the metal with the residual gases of the evacuated space. The resulting oxide films prevent physical contact and the further development of a high-quality solid connection of parts. Due to the transience of the growth and dissolution of oxides on the connected surfaces and the inability to quantify their value in dynamics, we proposed a physical and mathematical modeling of the process of growth and dissolution of oxides, which allows us to determine the time and temperature of heating surfaces at which welding pressure can be applied to the contact surfaces free of oxides. Based on the analysis of graphical dependencies, we found that the reduction in the thickness of the oxides, up to their almost final removal, depends on the heating rate. At a higher rate of temperature rise, a smaller layer of oxides is formed. The same situation is observed when increasing the degree of vacuuming in a sealed chamber. For practical tasks, the established mathematical and graphical data allow us to determine the technological schemes and conditions under which it becomes possible to bring the connected surfaces of titanium parts into contact when their surfaces are unblocked from oxides, which, in turn, determines the quality and reliability of the diffusion-welded joint

Key words: diffusion-welded joint, oxide film, heating rate, interaction, contact surfaces, mathematical model

References

1. Shurupov V.V. "Research and development of the process of diffusion welding of titanium porous and compact workpieces" ("Issledovanie i razrabotka protsessa diffuzionnoy svarki titanovykh poristykh i kompaktnykh zagotovok"), Cand. of Tech. Sci. diss., Voronezh, 1997, 168 p.
2. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. "Equations of mathematical physics" ("Uravneniya ma-tematicheskoy fiziki"), Moscow, Nauka, 1972, 134 p.
3. Linetskiy B.L., Krupin V.A., Opара B.K., Rakoch A.G. "Basically heating of rare metals and alloys in a vacuum" ("Bezokislitel'nyy nagrev redkikh metallov i spлавov v vakuume"), Moscow, Metallurgiya, 1985, 183 p.

4. Bay A.S., Layner I.D., Slesareva E.N., Tsypin, M.I. "Oxidation of titanium and its alloys" ("Okislenie titana i ego splavov"), Moscow, Metallurgiya, 1970, 317 p.
5. Evans U.R. "Corrosion and oxidation of metals" ("Korroziya i okislenie metallov"), Moscow, Mashgiz, 1962, 856 p.
6. Zhuk I.P. "Course of the theory of corrosion and protection of metals" ("Kurs teorii korrozii i zashchity metallov"), Moscow, Metallurgiya, 1976, 473 p.
7. Peshkov V.V., Rodionov V.N., Podoprikin M.N. "Creep of titanium alloy OT4 with coarse-grained structure", *News of Universities. Non-ferrous metallurgy (Izv. VUZov. Tsvetnaya metallurgiya)*, 1980, no. 5, pp. 95-97.

Submitted 10.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Igor' L. Bataronov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department of Higher Mathematics and Physical and Mathematical Modeling, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vmfmm@mail.ru, tel. +7(473)246-42-22.

Vladimir V. Peshkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kaf-tspd@yandex.ru, tel. +7(473)278-38-84

Vladimir F. Selivanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Department of Welding Production Technology and Diagnostics, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vf_selivanov@mail.ru, tel. +7(473)278-38-84

Vladimir V. Shurupov, Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: shurupov.svarka@yandex.ru, tel. +7(473)278-38-84

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА

В.В. Жмурин, А.В. Анцев

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Аннотация: рассмотрена характерная для современного машиностроения тенденция по увеличению концентрации технологических операций на многоцелевых станках и интенсификации режимов резания. Приведен анализ станочных парков различных металлообрабатывающих предприятий, который показал преобладание станков фрезерно-расточной группы. Проанализированы причины широкой номенклатуры инструментальной системы станков фрезерно-расточной группы и рассмотрено влияние многообразия инструментальной системы на динамические характеристики многоцелевых станков. Рассмотрен пример характерной для станков фрезерно-расточной группы среднего типоразмера инструментальной системы, которая включает в себя цанговый патрон, цангу и фрезу. Приведены расчеты точности и жесткости для различных вариантов инструментальной системы. С целью подтверждения полученных теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования в условиях реального производства при обработке серийно изготавливаемой детали типа «Корпус» на фрезерном многоцелевом станке модели VMC-600. Результаты обработки экспериментальных данных показали, что точность инструментальной системы значительно влияет на геометрическую точность обработанной детали, виброустойчивость инструментальной системы и ее жесткость. Низкая точность инструментальной системы приводит к значительному отжиму режущего инструмента на рекомендуемых режимах резания, который может превысить величину допуска на обработку, что должно быть учтено на этапе проектирования технологического процесса путем занижения режимов резания

Ключевые слова: инструментальная система, многоцелевой станок, точность, динамические характеристики, жесткость

Введение

Для выпуска конкурентоспособной продукции современные рыночные условия требуют от металлообрабатывающих предприятий высокой производительности при минимально коротких сроках подготовки производства при условии соблюдения достаточной точности и высокого качества обработанной поверхности. Выполнение указанных требований достигается сокращением штучного времени и снижением деформаций в системе «станок-приспособление-инструмент-деталь (заготовка)», приводящих к погрешности размеров и геометрической формы обработанной детали. Отсюда вытекает характерная для современного станкостроения тенденция по увеличению концентрации технологических операций и интенсификация режимов резания [1-3]. Такое решение позволяет повысить производительность обработки и расширить номенклатуру обрабатываемых деталей. Необходимым условием выполнения указанного направления является повышение статической и динамической жесткости, а также виброустойчивости станка [1].

В настоящее время станочный парк современного металлообрабатывающего предприятия представлен многоцелевыми станками (МЦС) фрезерно-расточной и токарной группы. По сравнению с универсальными и специальными станками они обеспечивают более широкие технологические возможности, выраженные в высокой точности обработки и концентрации технологических операций на рабочем месте, гибкости переналадки при переходе на изготовление нового изделия [1]. Анализ станочных парков различных металлообрабатывающих предприятий показал, что в них преобладают станки фрезерно-расточной группы, которые составляют от 54 % до 65 % от общего количества оборудования, а токарные 25 %-30 %. Практика применения многоцелевых станков фрезерно-расточной группы показывает, что они используются для операций фрезерования, сверления, резьбонарезания, а также чистового растачивания отверстий по 7-8 квалитету [4, 5].

Увеличение концентрации операций, выполняемых на станке, неизбежно влечет рост количества применяемых инструментальных систем. Так, результаты анализа используемых инструментальных систем показали, что использование на фрезерно-расточном МЦС по-

мимо типового фрезерного инструмента ещё и осевого инструмента и расточных систем приводит к увеличению номенклатуры инструментальных систем минимум на порядок. Также различна номенклатура обрабатываемого на данном оборудовании материала. Она включает в себя конструкционные легированные стали, нержавеющей стали, а также алюминий и сплавы на его основе, при этом не редки ситуации обработки заготовок из разных групп обрабатываемых резанием материалов на одном многоцелевом станке попеременно [6, 7]. Указанные факторы приводят к необходимости использования на станке большого количества различных инструментальных систем.

Различные инструментальные системы отличаются друг от друга по точности и жесткости из-за различий в своей конструкции и качеству изготовления. При этом используемая инструментальная система оказывает существенное влияние на динамические характеристики многоцелевого станка, в частности, его виброустойчивость [3, 8-10], что должно быть учтено при проектировании технологических процессов.

Расчет суммарной погрешности инструментальной системы

Для вычисления суммарной погрешности системы применяется теоретико-вероятностный метод. В соответствии с данным методом, режущий инструмент рассматривается как замыкающее звено размерной цепи, от которого зависит точность обработки. При этом замыкающее звено учитывает коэффициенты относительного рассеивания и передаточные отношения других звеньев инструментальной системы [11, 12].

На многоцелевых станках фрезерно-расточной группы среднего типоразмера широкое применение получили инструментальные системы, состоящие из цангового патрона, цанги и режущего инструмента [10, 11]. Точность каждого элемента инструментальной системы устанавливается международными стандартами DIN 2080, DIN 6499, DIN 228, DIN 69871 и DIN 6388.

На основании стандартов DIN 69871 и DIN 6499 производители инструмента серийно изготавливают цанговые патроны со следующими

значениями точности: 0,003; 0,005; 0,01 и 0,04 мм, и цанги, используемые в них, со следующей точностью: 0,005; 0,015; 0,020 и 0,025 мм. Таким образом, только комбинированием цанг можно получить четыре варианта точности инструментальной системы. Это делает актуальным расчет её точности на этапе подготовки производства.

Для оценки изменения точности инструментальной системы в зависимости от её компоновки по методике, изложенной в работах [11, 12], были выполнены расчеты системы, рассмотренной в работе [10]. В расчетах рассматривается типовая инструментальная система, состоящая из цангового патрона E3414567525120 фирмы SECO, цанги ER 25 №58802513 фирмы SECO и концевой твердосплавной фрезы Ø12мм 422827-000120 фирмы Nanita. Её расчетная схема представлена на рис. 1.

Точность конуса шпинделя многоцелевых станков может быть 0,003 или 0,004 мм с допустимым перекосом оси, не превышающим 0,003 мм [13]. Фактическое значение перекоса оси шпинделя и погрешность изготовления конусного отверстия были определены из акта проверки оборудования на технологическую точность. В соответствии с ним $e_{\text{шп}} = 0,003$ мм, а $e_{\text{кон}} = 0,004$ мм. Значение биений элементов инструментальной системы было определено по каталогу завода-изготовителя.

Коэффициент рассеивания замыкающего звена инструментальной системы, приведенной на рис. 1, определяется формулой (1), где K_i – коэффициенты относительного рассеивания соответствующих i -х элементов системы.

Таким образом, общая погрешность инструментальной системы определяет величину её эксцентриситета и рассчитывается по формуле (2), где A_i – передаточные отношения соответствующих i -х элементов системы.

Для типового шпиндельного узла и рассматриваемой инструментальной системы, состоящей из цангового патрона, цанги и режущего инструмента, коэффициенты относительного рассеивания: $K_{\text{шп}} = 1,1$; $K_{\text{пат}} = 1,14$; $K_{\text{ц}} = 1,09$; $K_{\text{кон}} = 1,7$; а передаточные отношения: $A_{\text{шп}} = 1,1$; $A_{\text{пат}} = 1$; $A_{\text{ц}} = 1$; $A_{\text{кон}} = 1$ [12].

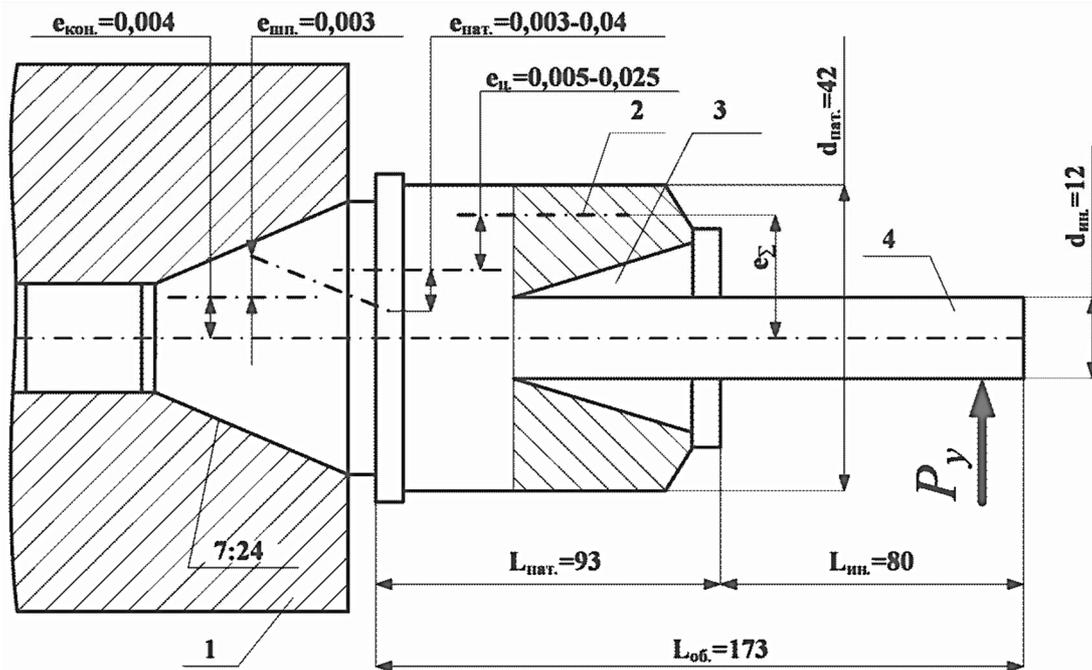


Рис. 1. Расчетная схема типовой инструментальной системы станка фрезерно-расточной группы среднего типоразмера: 1 – шпиндель; 2 – цанговый патрон E3414567525120; 3 – цанга ER 25 №58802513; 4 – режущий инструмент фреза 422827-000120; P_y – сила резания; $L_{пат}$ – длина цангового патрона; $L_{ин}$ – длина инструмента; $L_{об}$ – общая длина инструментальной системы; $e_{шп}$ – биение конуса шпинделя, вызванное её перекосом; $e_{кон}$ – биение, вызванное погрешностью изготовления конуса; $e_{пат}$ – биение цангового патрона; $e_{ц}$ – биение цанги; e_{Σ} – суммарное (общее) биение инструментальной системы

$$K_{\Sigma} = 1 + \frac{0,55}{e_{шп} + e_{кон} + e_{пат} + e_{ц}} \cdot \left(\sqrt{K_{шп}^2 e_{шп}^2 + K_{кон}^2 e_{кон}^2 + K_{пат}^2 e_{пат}^2 + K_{ц}^2 e_{ц}^2} - \sqrt{e_{шп}^2 + e_{кон}^2 + e_{пат}^2 + e_{ц}^2} \right). \quad (1)$$

$$2e_{\Sigma} = \frac{2}{K_{\Sigma}} \cdot \left(\sqrt{(e_{шп} \cdot K_{шп} \cdot A_{шп})^2 + (e_{кон} \cdot K_{кон} \cdot A_{кон})^2 + (e_{пат} \cdot K_{пат} \cdot A_{пат})^2 + (e_{ц} \cdot K_{ц} \cdot A_{ц})^2} \right). \quad (2)$$

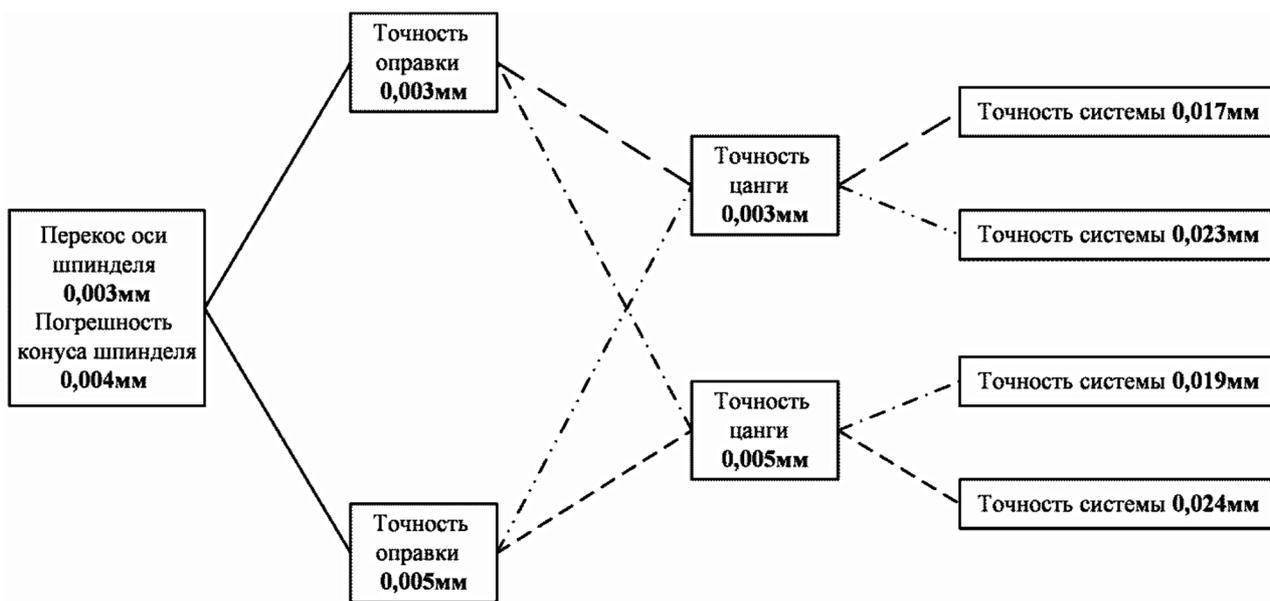


Рис. 2. Точность инструментальной системы в зависимости от компоновки её элементов

Результаты расчета показали, что комбинированием двух цанговых патронов и двух цанг можно получить четыре инструментальные системы с разницей в точности 7 мкм. Результаты расчетов показаны на рис. 2.

В соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [11, 12], получаемая точность инструментальной системы подходит для чистового фрезерования, выполняемого фрезой диаметром от 10 до 40 мм.

С целью подтверждения полученных теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования в условиях реального производства. Для их проведения была выбрана серийно изготавливаемая литейная деталь типа «Корпус», обрабатываемая на фрезерном МЦС модели VMC-600. Исследования были проведены для двух наиболее точных операций – фрезерование плоскости и чистовое расфрезерывание предварительно обработанного отверстия. На рис. 3 представлен эскиз обработки. В соответствии с известными рекомендациями по сбору и анализу экспериментальных данных обработка выполнялась на семи деталях без изменений инструментальной наладки.

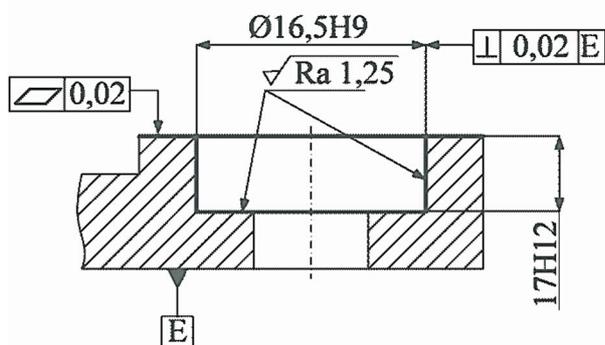


Рис. 3. Эскиз обработки экспериментальной детали

Фрезеровка плоскости заключается в получении поверхности с плоскостностью не более 0,02 мм и шероховатостью $Ra 1,25$. Предварительно поверхность была обработана с припуском под чистовую обработку 0,5 мм. Чистовое расфрезерывание отверстия заключается в получении размеров $\varnothing 16,5H9$ и $17H12$ с шероховатостью обработанных поверхностей $Ra 1,25$. Предварительно отверстие было расфрезеровано в размер $\varnothing 12,5H12$. В качестве режущего инструмента использована цельная твердосплавная фреза $\varnothing 12$ мм 422827-000120 фирмы Hanita.

Исходя из конструктивных особенностей обрабатываемой детали вылет режущего ин-

струмента должен составлять не менее 80 мм, таким образом, для фрезы $\varnothing 12$ мм он составляет 7 диаметров [14, 15]. Режимы резания в процессе обработки не изменялись. Контроль указанных размеров выполнялся контактным датчиком координатно-измерительной машины Werth.

После выполнения экспериментальной обработки деталей был проведен контроль размеров, указанных на рис. 3. Он выполнялся на координатно-измерительной машины Werth. Результаты замеров представлены в таблице.

Результаты обработки показали, что при использовании инструментальной системы с точностью 17 мкм среднее отклонение размера $\varnothing 16,5H9$ составляет 12 мкм от номинального значения. При использовании инструментальной системы самой низкой точности равной 24 мкм отклонение размера от номинального значения составляет 30 мкм, т. е. 70% от поля допуска.

Контроль качества обработанной поверхности показал, что при снижении точности инструментальной системы снижается и её виброустойчивость, что и подтвердили результаты замеров. При обработке отверстия с использованием системы с точностью 17 мкм среднее значение шероховатости поверхности составило 1,06 мкм. Далее по мере снижения точности инструментальной системы шероховатость системы возрастает и при точности 24 мкм она составляет 1,28 мкм.

Расчет жесткости инструментальной системы

Результаты проведенного эксперимента показали, что сила резания оказывает сравнимое с точностью инструментальной системы влияние на точность обработки вследствие отжима инструмента от заготовки. В результате отжима инструмента происходит отклонение от формы поверхности или её расположения. Соответственно, при проектировании технологического процесса помимо точности инструментальной системы необходимо также учитывать и её жесткость. Для оценки жесткости инструментальной системы рассматривается в виде телескопического стержня, состоящего из n упругих элементов. В процессе обработки под действием силы резания возникает изгиб её консольных участков и контактные деформации в конических и цилиндрических стыках [12, 16].

Результаты контроля размеров, выдерживаемых при экспериментальной обработке

Контролируемый размер, мм	Точность инструментальной системы, мм	Фактическое значение размера, замеренное на детали под порядковым номером						
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
Ø16,5H9(+0,043)	0,017	Ø16,51	Ø16,52	Ø16,51	Ø16,52	Ø16,51	Ø16,51	Ø16,52
Перпендикулярность оси отверстия Ø16,5H9		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Плоскостность 0,02		0,011	0,011	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012
Ra 1,25		1,22	1,22	1,23	1,25	1,25	1,22	1,25
Ø16,5H9(+0,043)	0,019	Ø16,52	Ø16,52	Ø16,51	Ø16,52	Ø16,53	Ø16,53	Ø16,52
Перпендикулярность оси отверстия Ø16,5H9		0,01	0,01	0,01	0,015	0,01	0,01	0,012
Плоскостность 0,02		0,012	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
Ra 1,25		1,21	1,23	1,25	1,25	1,25	1,25	1,27
Ø16,5H9(+0,043)	0,023	Ø16,53	Ø16,53	Ø16,54	Ø16,53	Ø16,54	Ø16,53	Ø16,54
Перпендикулярность оси отверстия Ø16,5H9		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Плоскостность 0,02		0,011	0,014	0,013	0,014	0,014	0,012	0,013
Ra 1,25		1,22	1,25	1,25	1,25	1,27	1,26	1,25
Ø16,5H9(+0,043)	0,024	Ø16,52	Ø16,53	Ø16,54	Ø16,54	Ø16,54	Ø16,53	Ø16,53
Перпендикулярность оси отверстия Ø16,5H9		0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,018	0,013
Плоскостность 0,02		0,016	0,013	0,015	0,015	0,014	0,016	0,017
Ra 1,25		1,25	1,25	1,27	1,26	1,25	1,28	1,28

В инструментальной системе, представленной на рис. 1, имеются три узла, в которых происходят изгибы: место соединения фрезы с цангой, соединение цанги с оправкой и соединение оправки со шпинделем. Для обеспечения требуемой точности необходимо выполнение условия $\delta_B \leq \delta_{Доп}$, где $\delta_{Доп}$ – величина поля допуска на размер, δ_B – величина отжима [16]. Для рассматриваемой инструментальной си-

стемы величина отжима может быть рассчитана по следующей формуле [12, 16]:

$$\delta_B = P_z \cdot \left[\frac{(l_{пат} + l_{ин})^3}{3EJ_{пат}} + \frac{l_{ин}^3}{3EJ_{ин}} + \frac{\theta_{кон.}}{M} (l_{пат} + l_{ин})^2 \cdot 10^{-3} + \frac{\theta_{пат}}{M} l_{ин}^2 \cdot 10^{-3} \right] \quad (3)$$

где $J_{пат}$ – осевой момент инерции цангового патрона; $J_{ин}$ – осевой момент инерции инструмента; $l_{пат}$ – длина патрона; $l_{ин}$ – длина инструмента; $\frac{\theta_{кон.}}{M}$ – контактные деформации

в конусе станка; $\frac{\theta_{пат}}{M}$ – контактные деформации в цанговом патроне.

На основании данных, приведенных в справочнике [16], величина контактных деформаций в шпинделе с 40-м конусом составляет $\frac{\theta_{кон.}}{M} = 0,00142 (кН \cdot м)^{-1}$; в цанговом патроне $-\frac{\theta_{пат}}{M} = 0,0014 (кН \cdot м)^{-1}$.

Результаты расчетов показывают, что применение режимов резания, рекомендуемых фирмой изготовителем инструмента, приведут к отжиму инструмента от 0,024 мм до 0,032 мм, что превышает величину допуска на обработку отверстия. Так как по конструктивным особенностям детали нельзя уменьшить длину инструментальной системы, то снижение величины отжима инструмента можно добиться занижением скорости резания на 40 %. Таким образом, при скорости резания 45 м/мин отжим инструмента составляет 0,0084 мм. Результаты расчетов подтверждаются замерами перпендикулярности и плоскостности обрабатываемых поверхностей.

Заключение

Точность инструментальной системы значительно влияет на геометрическую точность обработанной детали, виброустойчивость инструментальной системы и ее жесткость, и поэтому должна учитываться при проектировании технологических процессов. Низкая точность инструментальной системы приводит к значительному отжиму режущего инструмента на

рекомендуемых режимах резания, который может превысить величину допуска на обработку, что должно быть учтено на этапе проектирования технологического процесса путем занижения режимов резания.

Литература

1. Тенденции развития станкостроения [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.tapco.by/tendentsii-razvitiya-stankostroeniya>, свободный. (дата обращения: 03.03.2021).
2. Гонялин С. Состояние мирового станкостроения // Техномир. 2008. №2. С. 18-24.
3. Черпаков Б.И. Тенденции развития мирового станкостроения // СТИН. 2001. №5. С. 10-16.
4. Металлообрабатывающее оборудование: каталог компании «DEG-Rus». М., 2010. 304 с.
5. Резьбонарезные ОЦ с ЧПУ Akira-Seiki: каталог компании «Akira-Seiki». Ковров, 2010. 9 с.
6. Потапов В.А. Комплекующие элементы станков // Машиностроитель. 1998. № 9. С. 57-60.
7. Потапов В.А. Проблемы вибраций при высокоскоростном фрезеровании алюминия в авиакосмической промышленности и способы их решения // Modern machine shop. 2001. № 1. С. 10-20.
8. Черпаков Б.И. Развитие мирового станкостроения в начале XXI века // ИТО. 2011. № 1. С. 12-17.
9. Черпаков Б.И. Тенденции развития мирового станкостроения // СТИН. 2001. № 4. С. 3-8.
10. Влияние средств технологического оснащения на динамические характеристики оборудования/ В.В. Жмурич, В.С. Сальников, О.А. Ерзин, А.В. Анцев // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. Вып. 12-1. С. 33-42.
11. Оснастка для станков с ЧПУ: справочник / Ю.И. Кузнецов и др. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
12. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: справочник / А.Р. Маслов и др. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
13. Шпиндельные узлы серии НХ: каталог компании «Quaser». М., 2010. 40 с.
14. Справочник по резанию материалов GARANT: учеб. пособие. Германия: Институт им. Фраунгофера, 2010. 842 с.
15. Руководство по металлообработке «Technical Guide» фирмы «SANDVIK Coromant». М., 2010. 617 с.
16. Пини Б.Е., Зиновьев Д.А. Моделирование жесткости инструментальных систем станков для определения их влияния на точность обработки деталей // Известия МГТУ. 2008. № 2. С. 129-135.

Поступила 05.03.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах

Жмурич Владимир Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: vladimir_zhmurich@mail.ru
Анцев Александр Витальевич – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: a.antsev@yandex.ru

INFLUENCE OF TOOLING SYSTEM ACCURACY ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MULTI-PURPOSE MACHINE

V.V. Zhmurin, A.V. Antsev

Tula State University, Tula, Russia

Abstract: the article discusses the characteristic tendency of modern mechanical engineering to increase the concentration of technological operations on multi-purpose machine tools and intensify cutting modes. We give the analysis of machine parks of various metalworking enterprises, which showed the prevalence of milling and boring machines. This article analyzes the reasons for a wide range of tool systems for milling-boring machines and considers the influence of the diversity of the tool system on the dynamic characteristics of multi-purpose machines. We considered an example of a medium-sized tool system typical for milling and boring machines, which includes a collet chuck, a collet and a milling cutter. We give calculations of accuracy and stiffness for various versions of the instrumental system. In order to confirm the obtained theoretical calculations, we carried out experimental studies in real production conditions when processing a serially manufactured part on a VMC-600 multi-purpose milling machine. The results of experimental data processing showed that the accuracy of the tool system significantly affects the geometric accuracy of the machined part, vibration resistance of the tool system and its rigidity. The low accuracy of the tool system leads to a significant squeezing out of the cutting tool at the recommended cutting conditions, which can exceed the machining tolerance, which should be taken into account at the design stage of the technological process by understating the cutting conditions

Key words: tooling system, multipurpose machine, precision, dynamic characteristics, rigidity

References

1. "Trends in the development of machine tool building", available at: <http://www.tapco.by/tendentsii-razvitiya-stankostroeniya> (date of access: 03.03.2021).
2. Gonyalin S. "State of the world machine tool building", *Technical World (Technomir)*, 2008, no. 2, pp. 18-24.
3. Cherpakov B.I. "Trends in the development of world machine tool industry", *STIN*, 2001, no. 5, pp. 10-16.
4. "Metalworking equipment: catalog of the DEG-Rus company" ("Metalloobrabatyvayushchee oborudovanie: katalog kompanii «DEG-Rus»"), Moscow, 2010, 304 p.
5. "Thread-cutting OCs with CNC Akira-Seiki: catalog of the Akira-Seiki company" ("Rez'bonareznye OTS s CHPU Akira-Seiki: katalog kompanii «Akira-Seiki»"), Kovrov, 2010, 9 p.
6. Potapov V.A. "Component parts of machines", *Mechanician (Mashinostroitel')*, 1998, no. 9, pp. 57-60.
7. Potapov V.A. "Vibration problems in high-speed aluminum milling in the aerospace industry and ways to solve them", *Modern Machine Shop*, 2001, no. 1, pp. 10-20.
8. Cherpakov B.I. "Development of the world machine tool building at the beginning of the XXI century", *ITO*, 2011, no. 1, pp. 12-17.
9. Cherpakov B.I. "Trends in the development of world machine tool industry", *STIN*, 2001, no. 4, pp. 3-8.
10. Zhmurin V.V., Sal'nikov V.S., Erzin O.A., Antsev A.V. "Influence of means of technological equipment on the dynamic characteristics of equipment", *News of TulGU. Technical science (Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki)*, 2015, no. 12-1, pp. 33-42.
11. Kuznetsov Yu.I. et al. "Tooling for CNC machines" ("Osnastka dlya stankov s CHPU: spravochnik"), reference book, Moscow, Mashinostroenie, 1990, 512 p.
12. Maslov A.P. et al. "Tooling of CNC machine tools" ("Instrumental'naya osnastka stankov s CHPU: spravochnik") reference book, Moscow, Mashinostroenie, 2006, 544 p.
13. "Spindle assemblies of the HX series: catalog of the company "Quaser"" ("Shpindel'nye uzly serii NKH: katalog kompanii «Quaser»"), Moscow, 2010, 40 p.
14. "Handbook for cutting materials GARANT" ("Spravochnik po rezaniyu materialov GARANT: uchebnoe posobie"), Germany, Institute Fraunhofer, 2010, 842 p.
15. "Manual for metalworking "Technical Guide" by "SANDVIK Coromant"" ("Rukovodstvo po metalloobrabotke «Technical Guide» firmy «SANDVIK Coromant»"), Moscow, 2010, 617 p.
16. Pini B.E., Zinov'ev D.A. "Modeling the rigidity of machine tool systems to determine their influence on the accuracy of parts processing", *News of MSTU (Izvestiya MGTU)*, 2008, no. 2, pp. 129-135.

Submitted 05.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Vladimir V. Zhmurin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Tula State University (92 Lenina Ave., Tula 300012, Russia), e-mail: vladimir_zhmurin@mail.ru

Aleksandr V. Antsev, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Tula State University (92 Lenina Ave., Tula 300012, Russia), e-mail: a.antsev@yandex.ru

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА С ТЕПЛОВЫМ ЭНЕРГОПРИВОДОМ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

А.Ю. Боташев¹, А.А. Мусаев², М.А. Саидов²

¹Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Россия

²Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика
М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Россия

Аннотация: устройство с тепловым энергоприводом для прессования является разновидностью импульсных устройств. Оно позволяет значительно снизить себестоимость прессуемых железобетонных изделий. Для обеспечения высокой мощности устройства для прессования и уменьшения его габаритных размеров и металлоемкости в его конструкции используется тепловой энергопривод внутреннего сгорания. Существующие прессы для прессования бетонных изделий большой мощности конструктивно сложны и дороги. Поэтому прессование применяют в основном при формировании штучных бетонных изделий небольшого размера. Разработан новый вид устройства для прессования крупногабаритных бетонных изделий. Для выполнения этой цели сделано устройство с тепловым энергоприводом для прессования крупногабаритных бетонных изделий, обеспечивающее высокую прочность этих изделий. Разработанное устройство имеет высокую производительность. Получены зависимости для определения энергосиловых параметров данного устройства, а также необходимой величины давления топливной смеси, обеспечивающей осуществление процесса прессования. В частности, для прессования бетонной плиты площадью 1 м^2 вполне достаточно давления топливной смеси $0,9\text{ МПа}$. При этом давление и усилие прессования составляют: $P = 11,7\text{ МПа}$; $F = 11,7\text{ МН}$. При увеличении давления топливной смеси до 2 МПа усилие прессования достигает 20 МН , что вполне достаточно для прессования крупногабаритных бетонных изделий

Ключевые слова: прессование, прессование бетонных изделий, тепловой энергопривод

Введение

Прочность бетонных изделий существенно зависит от степени уплотнения бетонной смеси [1]. Существуют различные способы уплотнения бетонной смеси. В частности, широко используется вибрация бетонной смеси [2]. При этом прочность получаемых бетонных изделий составляет $50...70\text{ МПа}$. Наибольшую прочность бетонных изделий обеспечивает прессование при давлении $10...15\text{ МПа}$ [3]. При этом на каждый 1 м^2 поверхности бетонной смеси необходимо прикладывать $10...15\text{ МН}$. Однако существующие прессы такого усилия конструктивно сложны и очень дороги. В частности, гидравлические прессы большого усилия имеют насос высокого давления с гидроаккумулятором и сложную гидравлическую систему. Производительность прессы в значительной степени ограничивается скоростью подачи жидкости в цилиндр прессы и выпуска из нее.

Поэтому прессование применяют в основном при формировании штучных изделий небольшого размера. Однако используя опыт,

накопленный в области прессовых машин и устройств, используемых в металлургии и машиностроении [4], можно создать относительно недорогие мощные устройства для прессования бетонных изделий.

Целью данной работы является разработка мощного устройства для прессования крупногабаритных бетонных изделий, развивающее усилие не менее 10 МН и имеющее высокую производительность. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи: разработка нового вида устройства для прессования бетонных изделий и определение его энергосиловых параметров.

Для обеспечения высокой мощности устройства для прессования и уменьшения его габаритных размеров и металлоемкости целесообразно использовать в его конструкции тепловой энергопривод внутреннего сгорания. Это осуществлено в устройстве для прессования, схема которого представлена на рис. 1.

Описание конструкции и работы данного устройства дано в работе [5]. Устройство содержит тепловой энергопривод, включающий в себя цилиндр 2, поршень 5 с эластичным диском 7 и форкамеру 24.

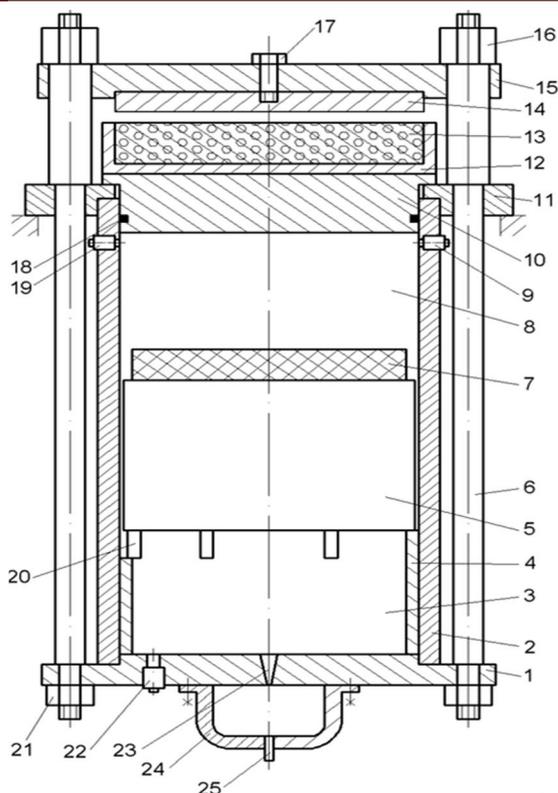


Рис. 1. Схема устройства для прессования крупногабаритных бетонных изделий:

- 1- крышка; 2- цилиндр; 3- камера сгорания; 4 - гильза с окнами; 5- поршень; 6 - стяжные колонны;
- 7 - эластичный диск; 8 - надпоршневая полость;
- 9 - выпускной клапан; 10 - дополнительный поршень;
- 11- плита; 12 - форма; 13 - железобетонная смесь;
- 14 - плита; 15 - поперечина; 16, 21 - гайки; 17 - болт;
- 18 - уплотнитель; 19, 22 - выпускные клапаны;
- 23 - конический канал; 24 - форкамера;
- 25 - свеча зажигания

Надпоршневая полость 8 цилиндра 2 наполняется сжатым воздухом, а камера сгорания 3 и форкамера 24 наполняются газообразной топливной смесью, например смесью сжатого воздуха с пропан-бутаном. При этом с обеих сторон поршня устанавливается одинаковое давление. Для совершения рабочего хода поршня 5 топливная смесь в форкамере 24 поджигается при помощи свечи 25, затем пламя из нее передается в камеру сгорания 3. Наличие форкамеры 24 обеспечивает интенсивное сгорание топливной смеси в камере сгорания 3 в течение очень короткого времени, что обеспечивает многократное увеличение давления в ней. Одновременно с этим открывается выпускной клапан 19 для выпуска сжатого воздуха из полости 8. Под действием давления продуктов сгорания поршень с диском 7 разгоняется вверх. В конце рабочего хода поршня 5 при соприкосновении эластичного диска 7 с допол-

нительным поршнем 10 за счет накопленной кинетической энергии поршня 5 осуществляется прессование бетонной смеси 13. После остановки поршень 5 под действием давления продуктов сгорания еще в течение 3...5 с остается в верхнем положении, осуществляя сжатие бетонной смеси 13. Это обеспечивает окончательное формирование бетонного изделия.

После завершения процесса прессования открывается выпускной клапан 22, и продукты сгорания выпускаются из камеры сгорания 3. При этом поршень 5 с диском 7 и дополнительный поршень 10 под действием сил тяжести возвращаются в исходные положения. После этого форма 12 с полученным изделием выводится из рабочей зоны устройства.

В данном устройстве для прессования наибольшее давление топливной смеси может достигать 2 МПа. При горении этой смеси давление продуктов сгорания достигает 16...17 МПа. За счет этого получается высокое давление прессования крупногабаритных бетонных изделий.

Проанализируем рабочий ход поршня. В процессе рабочего хода поршня есть вероятность отвода теплоты от газа к стенке рабочего цилиндра, но тепловые потери при этом сравнительно не велики. В поршневых двигателях внутреннего сгорания они составляют около 10% [6,7]. В данном случае условия аналогичные, поэтому тепловые потери не превышают 10% и они существенно не влияют на исследуемые нами параметры устройства для прессования.

В процессе рабочего хода поршень вместе с эластичным диском перемещается под действием разности давлений между камерой сгорания и рабочим цилиндром, при этом воздух из цилиндра вытесняется в атмосферу. Исходя из этого, запишем уравнение движения поршня:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{f_u}{m} (P_K - P_U), \quad (1)$$

где w – скорость поршня; m – масса поршня с диском; f_u – площадь поперечного сечения рабочего цилиндра; P_K, P_U – давление в камере сгорания и рабочем цилиндре соответственно; t – время. Процесс расширения газа в полости камеры сгорания считаем адиабатическим [8]. Тогда изменение параметров газа определяется следующим уравнением:

$$P_{KO} V_{KO}^{\kappa_{\Gamma}} = P_K V_{K1}^{\kappa_{\Gamma}}, \quad (2)$$

где $P_{к0}$, P_k – начальное и текущее значения давления продуктов сгорания; $V_{к0}$ – начальный объем камеры сгорания; $V_{к1}$ – текущее значение объема продуктов сгорания; K_Γ – показатель адиабаты продуктов сгорания. Будем считать, что процесс сгорания совершается при постоянном объеме. Тогда давление в конце процесса сгорания равно

$$P_{к0} = \lambda P_c, \quad (3)$$

где P_c – давление топливной смеси; λ – степень повышения давления при сгорании топливной смеси в постоянном объеме.

Объем продуктов сгорания увеличивается за счет перемещения поршня, поэтому

$$V_{к1} = V_k + f_u X, \quad (4)$$

где X – ход поршня.

Из уравнений (2) – (4) получим закон изменения давления продуктов сгорания

$$P_k = \lambda P_c \left(\frac{V_k}{V_k + f_u X} \right) \quad (5)$$

В процессе перемещения поршня сжатый воздух из полости 8 цилиндра 2 вытесняется через выпускной клапан 19. При этом закон изменения давления в полости 8 определяется следующим уравнением [9]:

$$\frac{dP_u}{dt} = \frac{K_\epsilon P_u}{(h - X)} \left(W - \frac{\mu f_k}{f_u} g \sqrt{K_\epsilon R_\epsilon T_u} \right) \quad (6)$$

$$g = \left(\frac{2}{K_\epsilon + 1} \right)^{\frac{K_\epsilon + 1}{2(K_\epsilon - 1)}} \quad (7)$$

где P_u, T_u – давление и абсолютная температура газа в цилиндре; f_k – площадь проходного сечения выпускного клапана; μ – коэффициент расхода выпускного клапана; R_ϵ – газовая постоянная воздуха; K_ϵ – показатель адиабаты воздуха; h – начальная высота цилиндра, равная расстоянию от поверхности эластичного диска до обрабатываемой заготовки.

Проанализируем уравнение (6). В процессе рабочего хода поршня температура воздуха T_u существенно не изменяется. Поэтому величина выражения $\mu f_k f_u^{-1} g \sqrt{K_\epsilon R_\epsilon T_u}$ остается практи-

чески постоянной. Скорость поршня W в начале рабочего хода равна 0, а затем она монотонно увеличивается. Исходя из этого, можно заключить, что в начале рабочего хода поршня давление воздуха в полости 8 уменьшается, а затем оно увеличивается (рис. 2). Подбором соотношения площадей f_k / f_u можно обеспечить, чтобы давление в полости 8 не увеличилось выше его первоначального значения, равного давлению топливной смеси P_c . Исходя из этого, оценим работу торможения поршня воздухом, считая, что среднее значение давления воздуха в течение рабочего хода поршня равно P_c . Тогда

$$L_\epsilon = f_u P_c X = f_u P_c X. \quad (8)$$

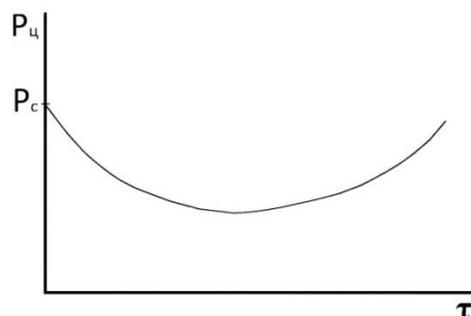


Рис. 2. Характер изменения давления воздуха в цилиндре

Определим теперь работу, совершаемую газом, находящимся в камере сгорания. Считая процесс расширения газа адиабатическим, можно записать [8, 10]:

$$L_\Gamma = \frac{1}{K_\Gamma - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2), \quad (9)$$

где L_Γ – работа, совершаемая газом, V_1, V_2 – начальный и конечный объемы газа, P_1, P_2 – начальное и конечное давление газа.

Для уравнения (9), принимая во внимание зависимости (3) – (5), можно записать:

$$V_1 = V_k; V_2 = V_k + f_u X, \quad (10)$$

$$P_1 = \lambda P_c; \quad (11)$$

$$P_2 = \lambda P_c \left(\frac{V_k}{V_k + f_u X} \right)^{K_\Gamma} \quad (12)$$

Обозначим

$$\delta = \frac{V_2}{V_1} = \frac{f_u X}{V_k} + 1, \quad (13)$$

где δ - степень расширения газа.

Подставляя выражения (10) - (13) в зависимость (9), получим

$$L_r = \frac{\lambda P_c V_k}{K_r - 1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{K_r - 1}} \right). \quad (14)$$

Кинетическая энергия поршня, за счет которой совершается процесс прессования, равна разности работ, совершаемых продуктами сгорания и воздухом, находящимся в полости 8, т.е.

$$E = L_r - L_6. \quad (15)$$

Тогда из зависимостей (9), (14), (15) получим выражение для определения кинетической энергии поршня

$$E = P_c V_k \left(\frac{\lambda}{K_r - 1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{K_r - 1}} \right) + 1 - \delta \right). \quad (16)$$

Кинетическая энергия поршня должна соответствовать энергии, затрачиваемой на прессование бетонной смеси. В этой связи рассмотрим процесс прессования бетонной смеси. При прессовании бетонной смеси относительное изменение ее объема пропорционально относительному изменению давления, т.е.

$$\frac{dV}{V_o} = \psi \frac{dP}{P}, \quad (17)$$

где V_o, V - начальное и текущее значения объема бетонной смеси;

P - давление на бетонную смесь;

ψ - модуль прессуемости.

При прессовании бетонного изделия (рис. 3) его поперечное сечение не изменяется, поэтому

$$V_o = SH, \quad dV = SdY, \quad (18)$$

где S - площадь поперечного сечения прессуемой бетонной смеси,

H - начальная высота бетонной смеси,

Y - перемещение прессующего инструмента.

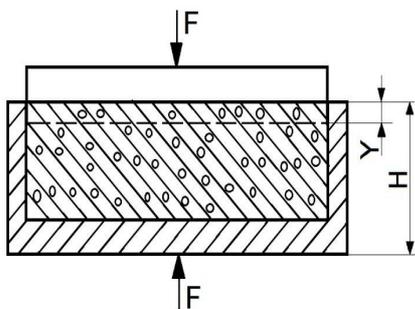


Рис. 3. Схема процесса прессования

Обозначим

$$y = Y/H, \quad (19)$$

где y - относительный ход инструмента.

Тогда

$$\frac{dV}{V_o} = \frac{sdY}{sH} = d \frac{Y}{H} = dy.$$

Подставляя это в уравнение (17), получим

$$dy = \psi \frac{dP}{P} \quad (20)$$

Интегрируя это уравнение, будем иметь

$$y = \psi \ln p + c. \quad (21)$$

Постоянную интегрирования c найдем из начальных условий: при $y=0$ $P=P_o$,

где P_o - давление начала прессования. Тогда

$$c = -\psi \ln P_o \quad (22)$$

Из уравнений (21) и (22) получим

$$y = \psi \ln \frac{P}{P_o} \quad (23)$$

Отсюда получим закон изменения давления прессования

$$P = P_o \ell^{\frac{y}{\psi}}. \quad (24)$$

Из зависимости (24) следует, что в процессе прессования давление нарастает по экспоненциальному закону. Следовательно, и усилие прессования повышается по такому же закону

$$F = SP = SP_o \ell^{\frac{y}{\psi}} \quad (25)$$

В начальный момент прессования усилие прессования $F_o = SP_o$. Тогда, исходя из зависимости (25), можно записать

$$F = F_o \ell^{\frac{y}{\psi}} \quad (26)$$

Логарифмируя эту зависимость, получим

$$y = \psi \ln \frac{F}{F_o} \quad (27)$$

Эта зависимость позволяет определить модуль прессования ψ . Определив экспериментально усилие прессования F при нескольких значениях y , можно вычислить осредненную величину ψ .

Используя зависимости (25), определим работу прессования. Элементарная работа прессования

$$\delta L_n = FdY = FHdy = HSP_o \ell^{\frac{y}{\psi}} dy.$$

Интегрируя, получим

$$L_n = HSP_o \int_0^{y_k} \ell^\psi dy = HSP_o \psi \left(\ell^{\frac{y_k}{\psi}} - 1 \right), \quad (28)$$

где y_k - степень деформации бетонной смеси в конце процесса прессования.

Для компенсации затрат энергии на упругую деформацию эластичного диска и других деталей конструкции устройства кинетическая энергия поршня должна быть больше работы прессования, т.е.

$$E = \alpha L_n, \quad (29)$$

где α - поправочный коэффициент, $\alpha = 1,05 \dots 1,1$.

Используя зависимости (16) и (28), из уравнения (29) получим

$$P_c V_k \left(\frac{\lambda}{K_r - 1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{K_r - 1}} \right) + 1 - \delta \right) = \alpha HSP_o \psi \left(\ell^{\frac{y_k}{\psi}} - 1 \right) \quad (30)$$

Отсюда получим зависимости для определения необходимой величины давления топливной смеси.

$$P_c = \frac{\alpha HSP_o \psi \left(\ell^{\frac{y_k}{\psi}} - 1 \right)}{V_k \left(\frac{\lambda}{K_r - 1} \left(1 - \frac{1}{\delta^{K_r - 1}} \right) + 1 - \delta \right)} \quad (31)$$

Оценим давление топливной смеси для случая прессования бетонной плиты площадью 1 м^2 и высотой 12 см, исходная высота бетонной смеси 15 см. При этом $S = 1\text{ м}^2$; $H = 0,12\text{ м}$; $y_k = 3/15 = 0,2$. Примем: $\psi = 0,042$, начальное давление прессования $P_o = 0,1\text{ МПа}$. Для продуктов сгорания газоздушных $K_r = 1,28$, $\lambda = 7$. Рациональная область значений степени расширения газа δ находится в пределах 4...5, примем $\delta = 4$. Объем камеры сгорания $V_k = 0,02\text{ м}^3$, примем также $\alpha = 1,2$. Тогда из зависимости (31) получим $P_c = 0,9\text{ МПа}$.

Следовательно, для прессования бетонной плиты площадью 1 м^2 вполне достаточно давления топливной смеси 0,9 МПа. При этом согласно зависимостям (24) и (25) давление и усилие прессования составляют: $P = 11,7\text{ МПа}$, $F = 11,7\text{ МН}$.

При увеличении давления топливной смеси до 2 МПа усилие прессования может достигать 20 МН. Таким образом, усилие, развиваемое разработанным устройством, превышает 10 МН, что вполне достаточно для прессования

крупногабаритных бетонных изделий повышенной прочности.

Оценим производительность разработанного устройства. Длительность рабочего цикла устройства складывается из длительности рабочего цикла его энергопривода и времени, затрачиваемого на ввод формы с бетонной смесью в рабочую зону устройства и вывод готового изделия из этой зоны. Рабочий цикл теплового энергопривода устройства состоит из следующих процессов: наполнение топливной смесью, сгорание топливной смеси, рабочий ход поршня, выпуск продуктов сгорания, обратный ход поршня. Длительность процесса наполнения топливной смесью составляет 4...5 с. Длительность процесса сгорания топливной смеси в форкамере и камере сгорания не превышает 0,2 с. Рабочий ход поршня составляет 0,5...1,0 с, в конце хода поршень удерживается в верхнем положении в течение 3...4 с для фиксации уплотнения полученного изделия. С учетом этого длительность рабочего хода поршня составляет около 5 с. Обратный ход поршня длится около 1 с. Длительность процесса выпуска продуктов сгорания не превышает 1 с. Следовательно, длительность рабочего цикла энергопривода составляет 11...12 с. Время, затрачиваемое на ввод формы с бетонной смесью в рабочую зону устройства, составляет 3...4 с. Столько же времени затрачивается на вывод готового изделия из рабочей зоны устройства. Таким образом, в целом длительность рабочего цикла устройства для прессования не превышает 20 с. Следовательно, его производительность составляет 3 изделия в минуту, что значительно превышает производительность существующих прессов для прессования крупногабаритных изделий.

Выводы

Обобщая изложенное, можно заключить следующее.

1. Разработан новый вид устройства для прессования крупногабаритных бетонных изделий, развивающее усилие более 10 МН.
2. Разработанное устройство имеет высокую производительность.
3. Получены зависимости для определения энергосиловых параметров разработанного устройства и необходимой величины давления топливной смеси, обеспечивающей осуществление процесса прессования.

Литература

1. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. М.: Книга по требованию, 2012. 688 с.
2. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий: учебник для строительных вузов. М.: Стройиздат, 1984. 672 с.
3. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Технология бетона, строительных изделий и конструкций [электронный ресурс]: учебник. М.: Издательство АСВ, 2016. 172 с. ISBN 978-5-4323-0029-4.
4. Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для студентов высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 480 с.
5. Пат. 173177. Российская Федерация, RU 173177 МПК В21J 7/24, В21D 26/08. Импульсная машина для обработки материалов давлением, патент на полезную модель / А.Ю. Боташев, А.А. Мусаев, М.А. Бетрахмадов; опубл. 15.08.2017, Бюл. №23.
6. Дьяченко В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания: учебник/ Пер. с украинского языка. Харьков: ХНАДУ, 2009. 500 с.
7. Ковылов Ю.Л. Теория рабочих процессов и моделирование процессов ДВС: учебник. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. 416 с.
8. 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.
9. 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.
10. Теплотехника: учеб. пособие/ А.В. Гдалев, А.В. Козлов, Ю.И. Сапрунов, С.Г. Майоров. Саратов: Научная книга, 2012. 286 с.

Поступила 09.03.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах

Боташев Анвар Юсуфович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические машины и переработка материалов», Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, Карачаево-Черкесская Республика, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: botashev11@mail.ru, тел. +7(918)717-03-43

Мусаев 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, тел. +7(968)862-83-43

Саидов Муслим Абдуллаевич - канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «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: saidoff@bk.ru, тел. +7(938)894-71-68

DEVELOPMENT OF A HEAT-DRIVEN DEVICE FOR MOLDING LARGE-SIZED CONCRETE PRODUCTS

A.Yu. Botashev¹, A.A. Musaev², M.A. Saidov²

¹North Caucasian State Academy, Cherkessk, Russia

²Grozny State Oil Technical University named after Academician M. D. Millionshchikov, Grozny, Russia

Abstract: a device with a thermal power drive for pressing is a type of impulse devices. It allows one to significantly reduce the cost of compacted reinforced concrete products. To ensure high power of the device for pressing and to reduce its overall dimensions and metal consumption, a thermal energy drive of internal combustion is used in its design. Existing presses for molding concrete products of high power are structurally complex and expensive. Therefore, pressing is used mainly in the formation of small-sized concrete pieces. This article is devoted to the development of a new type of device for pressing large-sized concrete products. To achieve this goal, we developed a device with a thermal power drive for pressing large-sized concrete products, which ensures the high strength of these products. The developed device has a high performance. We obtained dependences for determining the power parameters of the device, as well as the required pressure of the fuel mixture, which ensures the implementation of the pressing process. In particular, for pressing a concrete slab with an area of 1 m², a fuel mixture pressure of 0.9 MPa is sufficient. In this case, the pressure and the pressing force are: $P = 11,7 \text{ MPa}$, $F = 11,7 \text{ MN}$. With an increase in the pressure of the fuel mixture to 2 MPa, the pressing force reaches 20 MN, which is quite enough for pressing large-sized concrete products

Key words: thermal power drive, pressing, concrete products molding

References

1. Gorchakov G.I., Bazhenov Yu.M. "Construction materials" ("Stroitel'nye materialy"), Moscow, Kniga po trebovaniyu, 2012, 688 p.
2. Bazhenov Yu.M., Komar A.G. "Technology of concrete and reinforced concrete products" ("Tekhnologiya betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy"), Moscow, Stroyizdat, 1984, 672 p.
3. Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V. "Technology of concrete, building products and structures" ("Tekhnologiya betona, stroitel'nykh izdeliy i konstruktsiy"), Moscow, ASV, 2016, 172 p.
4. Bocharov Yu.A. "Forging and stamping equipment" ("Kuznechno-shtampovochnoe oboru-dovanie"), Moscow, Akademiya, 2008, 480 p.
5. Botashev A.Yu., Musaev A.A., Betrakhmadov M.A. "Impulse machine for processing materials by pressure" ("Impul'snaya mashina dlya obrabotki materialov davleniem"), utility model patent no.173177, Russian Federation, RU 173177 IPC B21J 7/24, B21D 26/08., publ. 08/15/2017, bul. no. 23.
6. D'yachenko V.G. "Theory of internal combustion engines" ("Teoriya dvigateley vnutrennego sgoraniya"), Kharkov, KhNADU, 2009, 500 p.
7. Kovylov Yu.L. "Theory of working processes and modeling of ICE processes" ("Teoriya rabochikh protsessov i modelirovaniye protsessov DVS"), Samara State Aerospace University, 2013, 416 p.
8. Erofeev V.L., Semenov P.D., Pryakhin A.S. "Heat engineering" ("Teplotekhnika"), Moscow, Akademkniga, 2008, 488 p.
9. Musaev A.A., Nogamirzaev S.M., Goltakov B.Kh., Kozlova I.I. "Research of a two-chamber device for sheet stamping", *Proc. of the VIII All-Russian Scientific-Practical Conf.: Youth, Science, Innovations (Molodezh', nauka, innova-tsii: materialy VIII Vseros. nauch.-prakt. konf.)*, Grozny, GGNTU, 2019, pp. 43-48.
10. Gdalev A.V., Kozlov A.V., Saprunov Yu.I., Mayorov S.G. "Heat engineering" ("Teplotekhnika"), Saratov, Nauchnaya kniga, 2012, 286 p.

Submitted 09.03.2021; revised 15.04.2021

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, tel.: +7 (918) 717-03-43

Abubakar A. Musaev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Grozny State Oil Technical University named after Academician M. D. Millionshchikov (100 Prospect Imeni Kh. A. Isaev, Grozny 364051, Chechen Republic, Russia), e-mail: brain_95@mail.ru, tel.: +7 (968) 862-83-43

Muslim A. Saidov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Grozny State Oil Technical University named after Academician M. D. Millionshchikov (100 Prospect Imeni Kh. A. Isaev, Grozny 364051, Chechen Republic, Russia), e-mail: saidoff@bk.ru, tel. +7 (938) 894-71-68

СТАБИЛИЗАЦИЯ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВАЛОВ ЛЕПЕСТКОВЫМИ КРУГАМИ

С.Г. Бишутин, И.Л. Шупиков

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

Аннотация: статья посвящена проблеме стабилизации показателей лепесткового шлифования протяженных цилиндрических заготовок для исключения влияния изнашивания инструмента на качество и производительность данной обработки. Представлены результаты исследований влияния изнашивания абразивного инструмента на процессы съема металла и формирования шероховатости обрабатываемой поверхности при лепестковом шлифовании. Более интенсивно изнашиваются круги большей зернистости, причем стойкость инструментов зернистостью 12...20 (ГОСТ 3647-80 (в ред. 1995 г.)) в 2...3 раза выше кругов зернистостью 40...50 и составляет 5...10 минут. Приведены данные по стойкости лепестковых шлифовальных кругов с учетом основных факторов процесса обработки. Установлено, что скорость съема металла при шлифовании неизношенными лепестковыми кругами зернистостью от 12 до 40 составляет 130...270 мм³/мин, параметр шероховатости Ra находится в пределах от 0,4 до 3,0 мкм, Sm – от 0,08 до 0,20 мм. Значения параметров шероховатости обрабатываемой поверхности вследствие изнашивания инструмента возрастают до 2-3 раз, а скорость съема материала с течением времени непрерывно уменьшается и может стать равной нулю. Предлагается стабилизировать показатели лепесткового шлифования путем непрерывного или периодического увеличения деформации (натяга) инструмента в процессе абразивной обработки, что позволит поддерживать на необходимом уровне требуемое число режущих зерен

Ключевые слова: шлифование лепестковыми кругами, качество и производительность обработки, изнашивание инструмента

Введение

Шлифование лепестковыми кругами благодаря жесткому креплению абразива и высокой эластичности применяемых инструментов позволяет производить обработку без прижогов, обеспечить требуемую шероховатость поверхности и сформировать в поверхностном слое заготовки остаточные напряжения сжатия [1, 2]. Однако широкое применение лепесткового шлифования для обработки наружных протяженных поверхностей валов (грузонесущих штанг фрикционных подъемников, торсионных валов транспортных средств, штоков шахтных стоек, деталей штанговых насосов и др.) ограничивается низкой стабильностью данного процесса вследствие интенсивного изнашивания абразивного инструмента [2]. В этой связи данные исследования, направленные на разрешение указанной проблемы, являются актуальными.

Постановка задачи

Исследование процессов изнашивания лепестковых шлифовальных кругов, формирования высотных и шаговых параметров шероховатости обрабатываемой поверхности и съема

материала в ходе обработки для научно обоснованных решений по стабилизации показателей лепесткового шлифования.

Изнашивание лепестковых шлифовальных кругов

Процесс изнашивания лепестковых шлифовальных кругов имеет свои особенности и существенно влияет на производительность обработки и качество поверхностей деталей машин [3, 4]. Лепестки круга содержат рабочий слой с абразивным материалом и связкой, а также тканевое основание инструмента. Изнашивание абразивных зерен и других компонентов лепестков приводит к нестационарности состояния рабочей поверхности инструмента и показателей процесса обработки.

В зависимости от условий шлифования изнашивание инструмента может происходить путем истирания, поверхностного или объемного разрушения или вырывания зерен из связки [3]. Могут наблюдаться сразу несколько указанных видов изнашивания при работе абразивного инструмента. Однако, как показали наши исследования, для лепестковых абразивных кругов наиболее характерным является процесс вырывания отдельных зерен или групп зерен из связки (рис. 1).

Работа лепестковых кругов сопровождается образованием микротрещин в рабочем слое в результате усталостных явлений из-за многократного изгиба лепестков при контактировании с заготовкой, что, в конечном итоге, приводит к отслаиванию от тканевого основания большого числа зерен и их удалению с рабочей поверхности инструмента. При длительной обработке могут наблюдаться надрывы лепестка и расслоение его тканевой основы (рис. 1).

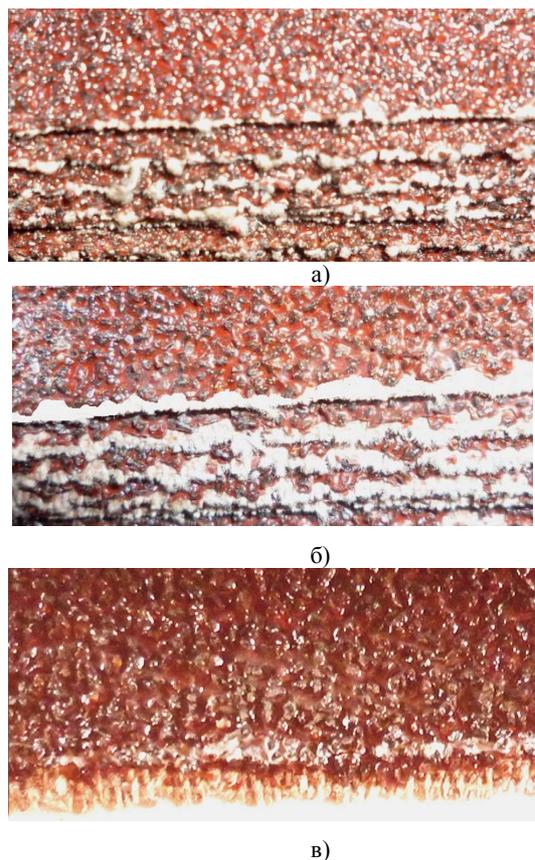


Рис. 1. Износ лепестков абразивного инструмента:
 а – неизношенный инструмент;
 б – лепестки инструмента после 3 мин работы;
 в – абразивный инструмент после 6 мин работы

Следовательно, в ходе обработки на рабочей поверхности лепестков круга постоянно уменьшается количество зерен. Такая нестационарность состояния абразивного инструмента приводит к непрерывному изменению показателей процесса обработки, что требует дополнительных исследований.

Исследование влияния изнашивания абразивного инструмента на параметры шероховатости поверхности и скорость съема металла при лепестковом шлифовании

Исследования включали эксперименты, которые проводились на заготовках из стали 30. Использовались лепестковые круги $\varnothing 200 \times 32 \times 50$ мм зернистостью $Z = 20$ (ГОСТ 3647- 80 (в ред. 1995 г.)) с простой ступицей. Деформация инструмента при обработке составляла 1,25 мм, скорость резания была равна 30 м/с, а частота вращения заготовки – 315 мин⁻¹. Время шлифования цилиндрической поверхности заготовки изменялось от 20 секунд до 5 минут. Эксперименты проводились на модернизированном токарно-винторезном станке, на суппорте которого была закреплена шлифовальная головка с возможностью изменения частоты вращения абразивного инструмента [5]. Скорость съема металла рассчитывалась на основе измерения микрометром диаметра заготовки до и после её обработки. Параметры шероховатости поверхности определялись с помощью профилографа-профилометра «Marsurf PS1». Исходная шероховатость обрабатываемой поверхности составляла $Ra=1,6$ мкм. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

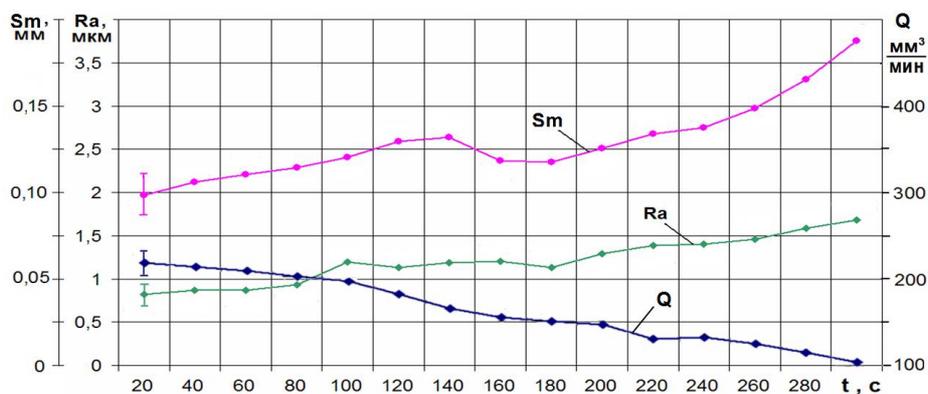


Рис. 2. Изменение высотного Ra и шагового Sm параметров шероховатости обрабатываемой поверхности и скорости Q съема металла в зависимости от времени t работы лепесткового шлифовального круга

Полученные данные показывают, что с увеличением времени обработки заготовки (до 5 мин) среднее арифметическое отклонение микронеровностей профиля Ra увеличивается в 2 раза, средний шаг микронеровностей профиля по средней линии Sm – в 1,7 раза, а скорость съема металла уменьшается в 2 раза (с 210 мм³/мин до 105 мм³/мин). Аналогичные исследования были проведены при зернистости лепесткового круга Z = 40, в ходе которых было установлено, что с увеличением времени обработки параметры шероховатости также увеличиваются в 2-3 раза, а скорость съема металла непрерывно уменьшается и стремится к нулю.

Такие изменения показателей процесса шлифования негативно сказываются на его эффективности, что вызывает необходимость принятия решений по нейтрализации влияния изнашивания инструмента на качество и производительность данной абразивной обработки.

Стабилизация показателей лепесткового шлифования путем увеличения натяга абразивного инструмента в процессе обработки

Стабилизировать рассмотренные показатели обработки можно корректировкой деформации (натяга) абразивного инструмента в ходе шлифования, что позволит поддерживать на необходимом уровне требуемое число режущих зерен.

Величину Δ изменения деформации (натяга) лепесткового шлифовального круга в

процессе обработки протяженных поверхностей валов можно определить по формулам:

- при непрерывном увеличении деформации (натяга)

$$\Delta = \delta(R)/T(Z, V); \quad (1)$$

- при периодическом увеличении деформации (натяга)

$$\Delta = \delta(R)/n_T. \quad (2)$$

В этих формулах: $\delta(R)$ – деформация (натяг) лепесткового шлифовального круга в зависимости от требуемого значения R параметра шероховатости (например, Ra или Sm); T(Z, V) – период стойкости лепесткового шлифовального круга как функция зернистости Z абразивного материала и скорости V резания (время, в течение которого происходило двукратное изменение показателя обработки); n_T – число подналадок технологической системы за период стойкости инструмента (n_T=5...10).

Для применения на практике формул (1) и (2) можно воспользоваться экспериментальными данными (таблица), полученными при лепестковом шлифовании стальных заготовок валов.

Для подтверждения состоятельности проведенных исследований были проделаны эксперименты с регулированием деформации лепесткового круга в процессе обработки, результаты которых представлены на рис. 3. Исследования проходили с использованием заготовок из стали 30 и лепестковых кругов Ø200×32×50 мм зернистостью Z = 40 с простой ступицей при скорости резания V = 15 м/с.

Влияние технологических режимов на показатели лепесткового шлифования стальных заготовок

Зернистость круга по ГОСТ 3647- 80	V, м/с	δ, мм	Ra, мкм	Sm, мм	Q, мм ³ /мин	T, мин
12	10 ...15	0,6	0,35...0,40	0,10...0,11	130...135	8,0...10,0
		1,7	0,45...0,50	0,11...0,12	140...150	7,5...9,0
	25 ...30	0,6	0,25...0,30	0,08...0,09	150...160	7,0...8,5
		1,7	0,30...0,35	0,10...0,11	160...170	6,5...8,0
20	10 ...15	0,6	0,80...1,10	0,10...0,11	175...180	5,5...6,5
		1,7	1,20...1,50	0,11...0,12	180...185	5,0...6,0
	25 ...30	0,6	0,60...0,80	0,09...0,10	190...200	5,0...5,5
		1,7	0,75...0,90	0,10...0,11	195...205	4,5...5,5
40	10 ...15	0,6	2,20...2,45	0,13...0,15	210...220	3,0...3,5
		1,7	2,60...3,0	0,15...0,20	220...230	3,0...3,5
	25 ...30	0,6	1,95...2,10	0,12...0,13	240...250	2,5...3,0
		1,7	2,15...2,30	0,14...0,15	250...270	2,0...2,5

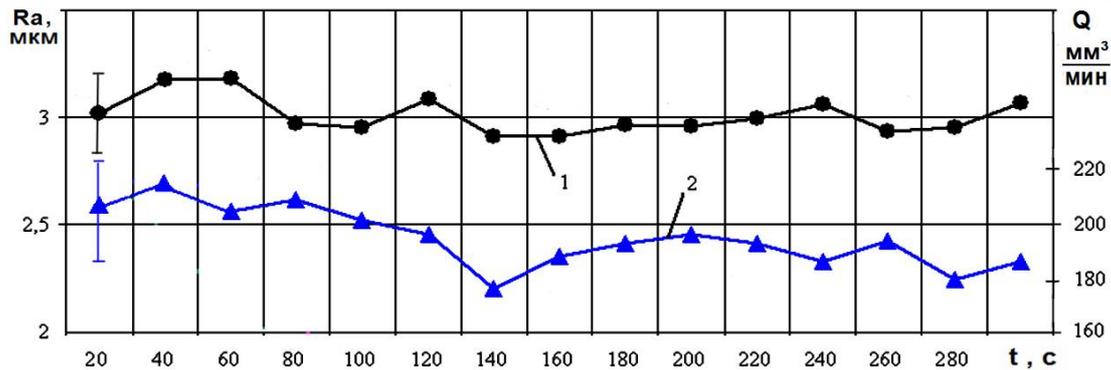


Рис. 3. Зависимости параметра шероховатости Ra (кривая 1) и скорости Q съема металла (кривая 2) от времени t обработки с коррекцией деформации лепесткового круга в процессе шлифования

Деформация лепесткового круга в процессе обработки составляла 1,25 мм, а частота вращения заготовки – 315 мин⁻¹. Каждый участок обрабатываемой поверхности подвергался шлифованию в течение 20 сек. Корректировка деформации (натяга) лепесткового круга осуществлялась на каждом участке на величину 0,05 мм.

Как видно из рис. 3, за счет регулирования деформации лепесткового круга в процессе шлифования удается стабилизировать параметры шероховатости поверхности и скорость съема металла в пределах $\pm 10\%$, что позволит применять лепестковое шлифование для обработки протяженных поверхностей заготовок.

Следует отметить, обработка поверхности с непрерывной корректировкой деформации лепесткового круга является более производительной, поскольку не требуется остановка технологического оборудования для подналадки [5]. Такую абразивную обработку целесообразно применять в условиях серийного производства валов.

Выводы и результаты

Анализируя проведенные исследования, можно констатировать следующее:

1. Изнашивание лепестков шлифовального круга путем вырывания зерен из связки приводит к непрерывному уменьшению скорости съема металла с заготовки и увеличению высоты шероховатости поверхности до 2...3 раз. Наиболее интенсивно процесс изнашивания протекает у кругов с большей зернистостью.

Например, при обработке стальных заготовок стойкость абразивных инструментов зернистостью 40 в 2...3 раза ниже лепестковых кругов зернистостью 12...20 и составляет 2...3 минуты.

2. Шлифование лепестковыми кругами зернистостью от 12 до 40 протяженных поверхностей валов характеризуется производительностью 130...270 мм³/мин и возможностью обеспечения параметров шероховатости Ra и Sm в пределах от 0,4 до 3,0 мкм и от 0,08 до 0,20 мм соответственно.

3. Стабилизировать параметры шероховатости поверхности и скорость съема металла можно путем периодического или непрерывного увеличения деформации лепесткового круга в процессе обработки. При этом изменение показателей процесса шлифования не превышает $\pm 10\%$.

Литература

- Гдалевич А.И. Финишная обработка лепестковыми кругами. М.: Машиностроение, 1990. 112 с.
- Бишутин С.Г. Совершенствование процессов финишной абразивной обработки заготовок деталей машин // Научно-технические проблемы в машиностроении. 2020. №1 (103). С. 34-40.
- Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов; под ред. И.П. Захаренко. Киев: Наук. думка, 1982. 189 с.
- Коротков А.Н., Шатько Д.Б. Повышение работоспособности лепестковых шлифовальных кругов: монография. Кемерово: КузГТУ, 2005. 184 с.
- Бишутин С.Г., Шупиков И.Л. Оборудование для обработки и качество протяженных цилиндрических поверхностей после лепесткового шлифования // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. № 5 (283). С. 35-40.

Поступила 09.03.2021; принята к публикации 15.04.2021

Информация об авторах

Бишутин Сергей Геннадьевич - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7), тел. 8-483-256-09-95, e-mail: nad-bisch@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9430-2936>

Шупиков Игорь Леонидович - канд. техн. наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Брянский государственный технический университет (241035, Россия, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7), тел. 8-483-256-09-95, e-mail: shupikovi@yandex.ru

STABILIZATION OF QUALITY AND PRODUCTIVITY OF GRINDING OF EXTENDED CYLINDRICAL SURFACES OF SHAFTS WITH PETAL CIRCLES

S.G. Bishutin, I.L. Shupikov

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract: the article is devoted to the problem of stabilization of indices of petal grinding of extended cylindrical billets in order to exclude the effect of tool wear on the quality and productivity of this treatment. We present the results of studies of influence of abrasive tool wear on processes of metal removal and formation of roughness of treated surface during petal grinding. Circles of greater grain wear more intensively, and the resistance of instruments with grain 12... 20 (GOST 3647- 80 (ed. 1995)) is 2...3 times higher than circles with grain 40...50 and is 5...10 minutes. We give the data on resistance of blade grinding wheels taking into account the main factors of the processing process. We found that the rate of metal removal when grinding with unworn petal circles with grain size from 12 to 40 is 130...270 mm³/min, the roughness parameter Ra can vary in the range from 0.4 to 3.0 μm, Sm – from 0.08 to 0.20 mm. The values of the roughness parameters of the treated surface due to wear of the tool increase by 2-3 times, and the rate of material removal over time continuously decreases and can become zero. We proposed to stabilize the indicators of petal grinding by continuous or periodic increase of deformation of the tool during abrasive processing, which will allow one to maintain the required number of cutting grains at the required level

Key words: grinding with petal circles, quality and efficiency of processing, tool wear

References

1. Gdalevich A.I. "Finishing in petal circles" ("Finishnaya obrabotka lepestkovymi krugami"), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 112 p.
2. Bishutin S.G. "Improving the processes of finishing abrasive processing of machine parts", *Science-Intensive Technologies in Mechanical Engineering (Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii)*, 2020, no. 1 (103), pp. 34-40.
3. Mishnaevskiy L.L., ed. Zakharenko I.P. "Wear of grinding wheels" ("Iznos shlifoval'nykh krugov"), Kiev, Naukova Dumka, 1982, 189 p.
4. Korotkov A.N., Shatko D.B. "Improving the efficiency of petal grinding wheels" ("Povyshenie raboto-sposobnosti lepestkovykh shlifoval'nykh krugov"), monograph, Kemerovo, KuzSTU, 2005, 184 p.
5. Bishutin S.G., Shupikov I.L. "Equipment for processing and quality of extended cylindrical surfaces after petal grinding", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2010, no. 5 (283), pp. 35-40.

Submitted 09.03.2021; revised 15.04.2021

Information about the authors

Sergey G. Bishutin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Bryansk State Technical University (7 Boulevard of 50 let Oktyabrya, Bryansk 241035, Russia), tel.: +7-483-256-09-95, e-mail: nad-bisch@yandex.ru, ORCID iD 0000-0002-9430-2936

Igor' L. Shupikov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Bryansk State Technical University (7 Boulevard of 50 let Oktyabrya, Bryansk 241035, Russia), tel. +7-483-256-09-95, e-mail: shupikovi@yandex.ru