СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Высокопроизводительная система числового программного управления на базе программируемых логических интегральных схем
А.А. Зеленский, М.А. Харьков, С.П. Ивановский, Т.Х. Абдуллин……..….. 8
Структура системы управления сложным РТК на основе аппаратного искусственного интеллекта
В.Ж. Бочаров, В.Л. Бурковский…..……..…… 13
Формализация процесса разработки пользовательского кроссплатформенного мобильного приложения
В.Н. Черников, С.Л. Подвальный, В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный……..……. 18
Повышение эффективности процессов оперативного управления и технологической координации на основе оценки производственного расписания
М.А. Цуканов, О.А. Божкова……...…….. 27
Программная реализация поиска пути для множества объектов с областями различной проходимости
В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, А.К. Донских, С.А. Коваленко …….. 33
Использование API-интерфейса Plant Simulation для оптимизации транспортной системы производственного подразделения
П.Ю. Гусев, Ю.С. Скрипченко, А.А. Пак, К.Ю. Гусев……..……. 42
Сравнительный анализ архитектур кроссплатформенного программного обеспечения
В.Н. Черников, С.Л. Подвальный, В.Ф. Барабанов, В.В. Сафронов……..... 47
Метод генерации оптимальных траекторий квадрокоптера посредством выпуклого программирования
С.И. Савин, Л.Ю. Ворочаева, А.И. Савин…….…….……. 54

Энергетика

Получение полных вероятностных характеристик параметров режимов задач электроэнергетики
Ю.Д. Бай, А.В. Шмойлов, М.В. Андреев, А.А. Суворов, А.В. Киевец, И.А. Разживин…….……. 64
Структурный анализ энерготехнологических комплексов малой распределенной генерации
О.В. Афанасьева, Г.Р. Мингалеева…….. 75
Выбор обмоток дискового синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов
Т.Е. Черных, С.А. Белозоров, А.В. Тикунов…….. 84

Радиотехника и связь

Разработка методики компоновки блоков РЭС с учетом электромагнитных и тепловых характеристик
М.А. Ромащенко, А.П. Стрельцов…….……... 95
Высококачественные малогабаритные акустические системы для беспроводных сетей передачи информации
А.С. Бадаев, А.И. Сукачев, В.О. Алексеев, П.А. Кондратов …….. 102
Анализ производительности многопроцессорной системы цифровой обработки сигналов в корпусе 1867ВА016Т
Г.В. Фетисов, Д.В. Шеховцов, Е.Д. Алперин…… 108

Разработка и применение методики для определения защитных отношений в устройствах, использующих разные принципы модуляции сигнала
Д.В. Васильченко, А.А. Пирогов, И.В. Остроумов, А.Б. Антиликаторов……. 114
Высокоэффективный рупорный автомобильный сабвуфер
А.С. Бадаев, Д.К. Фомин……..... 119

Машиностроение и машиноведение

Топография, химический и фазовый состав поверхностей разрушения диффузионно-сварных соединений
В.В. Пешков, А.Б. Булков, С.Б. Кущев, Б.Л. Агапов, А.И. Донцов, С.В. Канныкин……..……..... 124
Выбор оптимального набора для капиллярной дефектоскопии
И.О. Богачев, М.Н. Давыдов, Ю.С. Ткаченко……...……. 132
Метод повышения качества обшивок самолета
М.В. Молод, В.И. Максименков, В.И. Федосеев……...……..….. 138
Влияние кинематики движения инструмента на формирование износостойкого покрытия
С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Г.И. Трифонов, Н.А. Пеньков……... 142

Физика

Влияние замещения железа ионами никеля на диэлектрические свойства сегнетокерамики $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ со структурой фаз Ауривиллиуса
Н.А. Толстых, А.И. Бочаров, И.Ю. Кобяков, С.А. Гриднев…… 148
Моделирование методом молекулярной динамики атомной структуры аморфных сплавов системы Re-Gd
А.В. Бондарев, И.Л. Батаронов, И.М. Пашуева……... 154
Влияние давления и температуры на кинетику травления $LiTaO_3$ во фторсодержащей плазме
И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов…..…….... 160
Влияние химического и фазового состава на ударную вязкость износостойких белых чугунов
Л.С. Печенкина……. 165
Эффективная упругая нелинейность чистого собственного сегнетоэластика $KH_3(SeO_3)_2$
С.А. Гриднев, И.И. Попов……... 172

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

High-performance numerical control system based on programmable logic devices
A.A. Zelenskiy, M.A. Khar'kov, S.P. Ivanovskiy, T.Kh. Abdullin..... 8
Structure of the control system of complex RTC basing on hardware-controlled artificial intelligence
V.Zh. Bocharov, V.L. Burkovskiy..... 13
Developing process formalization of a user cross-platform mobile application
V.N. Chernikov, S.L. Podvalny, V.F. Barabanov, A.M. Nuzhnyy..... 18
Improving the efficiency of operational management and technological processes of coordination based on the assessment of the production schedule
M.A. Tsukanov, O.A. Bozhkova 27
Software implementation of pathfinding for multiple objects with areas of different permeability
V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, A.K. Donskikh, S.A. Kovalenko..... 33
Using the Plant Simulation API for optimizing the transport system of the production department
P.Yu. Gusev, Yu.S. Skripchenko, A.A. Pak, K.Yu. Gusev..... 42
Comparative analysis of architectures of cross-platform software
V.N. Chernikov, S.L. Podvalny, V.F. Barabanov, V.V. Safronov..... 47
Optimal trajectory generation for a quadrotor using convex programming
S.I. Savin, L.Yu. Vorochaeva, A.I. Savin..... 54

Energetics

Obtaining the full probabilistic characteristics of the parameters of electric energy tasks
Yu.D. Bay, A.V. Shmoylov, M.V. Andreev, A.A. Suvorov, A.V. Kievets, I.A. Razzhivin... 64
Structural analysis of energy-technology complexes of small distributed generation
O.V. Afanas'eva, G.R. Mingaleeva……... 75
Selecting windings of disk synchronous generator with excitation from permanent magnets
T.E. Chernykh, S.A. Belozorov, A.V. Tikunov..... 84

Radio engineering and communication

Development of the methodology for the reds block compounding taking into account electromagnetic and thermal characteristics
M.A. Romashchenko, A.P. Strel'tsov……... 95
High-quality small acoustic systems for wireless information transmission networks
A.S. Badaev, A.I. Sukachev, V.O. Alekseev, P.A. Kondratov..... 102
Productivity analysis of the multi-processor system of digital processing of signals in the case 1867VA016T
G.V. Fetisov, D.V. Shekhovtsov, E.D. Alperin..... 108
Development and application of methods for definition of protective relations in devices using different principles of signal modulation
D.V. Vasil'chenko, A.A. Pirogov, I.V. Ostroumov, A.B. Antilikatorov..... 114
Highly efficient horny automobile subwoofer
A.S. Badaev, D.K. Fomin..... 119

Mechanical engineering and science of machines

Topography, chemical and phase composition of surfaces of diffusion-welded compounds
V.V. Peshkov, A.B. Bulkov, S.B. Kushchev, B.L. Agapov, A.I. Dontsov, S.V. Kannykin... 124

Comparative characteristics of kits for capillary defectoscopy
I.O. Bogachev, M.N. Davydov, Yu.S. Tkachenko……..... 132
The way to increase quality of an aircraft skin
M.V. Molod, V.I. Maksimenkov, V.I. Fedoseev..... 138
Influence of kinematics of the tool movement on the wear-resistant coating formation
S.Yu. Zhachkin, M.N. Krasnova, G.I. Trifonov, N.A. Pen'kov..... 142

Physics

Effect of iron replacement by nickel ions on dielectric properties of ferroelectric ceramics $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ with the Aurivillius phase structure
N.A. Tolstykh, A.I. Bocharov, I.Yu. Kobyakov, S.A. Gridnev..... 148
Molecular-dynamics simulation of atomic structure of amorphous alloys of a Re-Gd system
A.V. Bondarev, I.L. Bataronov, I.M. Pashueva..... 154
Influence of pressure and temperature on the kinetics of etching of Lithium Tantalate in fluorinated plasma
I.V. Konyaev, L.N. Vladimirova, E.N. Bormontov…..... 160
Influence of chemical and phase composition on shock viscosity on wear-resistant white cast iron
L.S. Pechenkina..... 165
Effective elastic nonlinearity of the pure proper ferroelastic $KH_3(SeO_3)_2$
S.A. Gridnev, I.I. Popov…… 172

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 681.5

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

А.А. Зеленский, М.А. Харьков, С.П. Ивановский, Т.Х. Абдуллин

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

Аннотация: представлена разработанная комплектная система числового программного управления станками со сложной кинематикой, промышленными роботами и автоматизированными комплексами. Система управления имеет модульную структуру, а вычисления в системе управления распределены по составным модулям. Программное ядро системы реализовано на многопроцессорной архитектуре, интегрированной в топологию программируемой логической интегральной схемы. Такой подход имеет ряд существенных преимуществ. Исследования показали, что реализация программного ядра под управлением операционной системы существенно увеличивает время отклика системы на внешние события и снижает отказоустойчивость. По этой причине в рассмотренной системе управления ядро работает без применения операционной системы (bare metal). Применение специализированных аппаратных инструкций и распределение вычислений по ядрам архитектуры позволило существенно снизить время расчетов. Реализованный в ядре системы программируемый логический контроллер, а также разработанный высокопроизводительный интерфейс и протокол связи между модулями системы дают возможность для эффективного управления сложной электроавтоматикой станочного оборудования и автоматизированных линий. Система была успешно испытана на станках ведущих станкостроительных предприятий Российской Федерации и является вкладом в обеспечение технологической независимости государства

Ключевые слова: числовое программное управление, распределенные вычисления, высокопроизводительный интерфейс и протокол связи

Введение

В современном производстве происходит непрерывное совершенствование оборудования и технологий обработки, применяются новые эффективные инструменты. В связи с этим растут скорость и точность обработки деталей, что, в свою очередь, повышает требования к системам управления технологическим оборудованием и системам числового программного управления (ЧПУ). Растут требования как к системам непосредственного формообразования, так и обслуживанию вспомогательных систем станочного оборудования и автоматизированных линий.

В статье рассмотрены решения для реализации высокопроизводительного и эффективного управления станками, робототехническими комплексами и автоматизированными линиями. Решения, описанные в статье, легли в основу комплектной системы ЧПУ «Перспектива», разработанной и производимой в МГТУ «СТАНКИН».

Развитие отечественных систем ЧПУ и импортозамещение систем управления на российских предприятиях имеют важное значение, поскольку являются основным фактором в обеспечении технологической независимости государства.

Особенности реализации

В основе разработанной системы ЧПУ лежит программно-аппаратный комплекс, который решает и задачу формообразования, и задачу управления системами электроавтоматики. Для реализации задач был выбран модульный принцип построения системы управления. Центральным элементом системы ЧПУ является базовый вычислительный модуль (БВМ). БВМ выполнен на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) семейства FPGA [1]. На ПЛИС реализована двухъядерная процессорная архитектура (технология софт-процессоров [2]). На двухъядерной процессорной архитектуре производятся вычисления алгоритмов ЧПУ, а также выполнен программно-реализованный программируемый логический контроллер (ПЛК, Soft PLC – англ.), на котором производятся вычисления центрального алгоритма управления электроавтоматикой, рис. 1.

© Зеленский А.А., Харьков М.А., Ивановский С.П., Абдуллин Т.Х., 2018

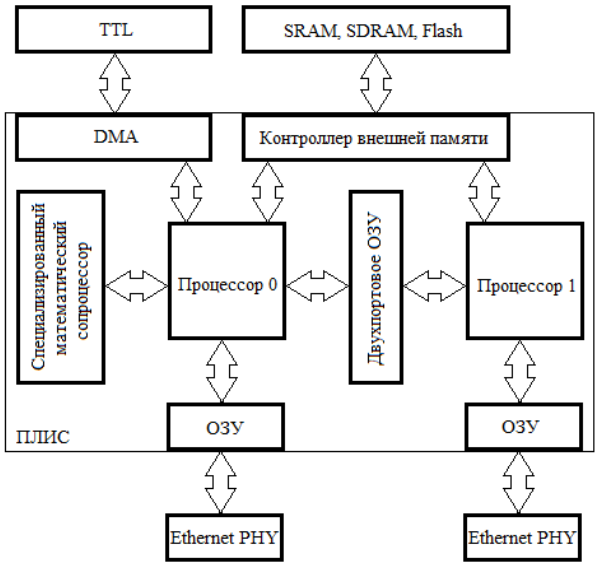


Рис. 1. Базовый вычислительный модуль

Как правило, в компьютерных системах ЧПУ ядро системы работает под управлением операционной системы (ОС) и имеет подчиненное положение, что существенно повышает время отклика системы на внешние события (например прерывания). Такие системы управления называют системами «мягкого реального времени» и они применяются в случаях, где превышение строго отведенного времени на реакцию системы не приводит к аварийным ситуациям, а лишь кратковременно увеличивает затраты пропорционально времени задержки реакции. Для уменьшения времени отклика применяют специальные обновления ОС, так называемые «патчи реального времени» (RT patch) [3], рис. 2 и 3.

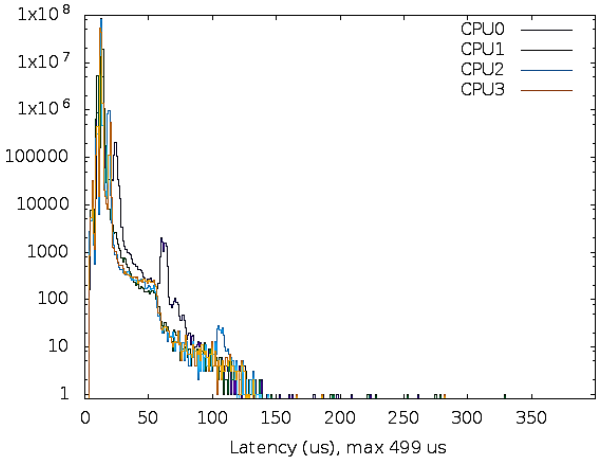


Рис. 2. Время отклика системы без применения патча «реального времени», максимум 499 мкс

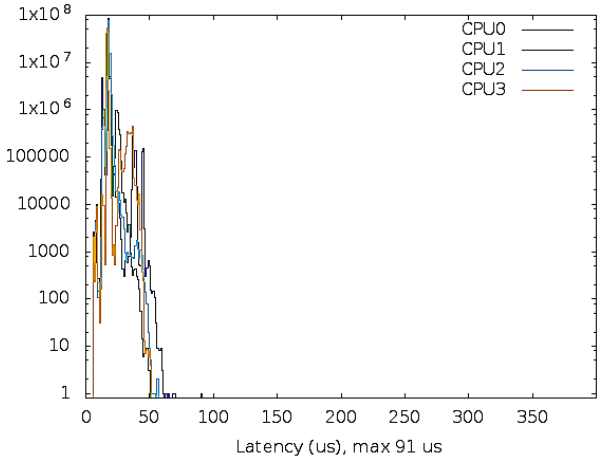


Рис. 3. Время отклика системы с применением патча «реального времени», максимум 91 мкс

Однако для применения в системах «жесткого реального времени», там где запаздывание приравнивается к отказу системы и может привести к авариям, этих мер может быть недостаточно. По этой причине в рассмотренной системе ЧПУ ядро системы работает без применения операционной системы (bare metal), что повышает быстродействие и отказоустойчивость.

Реализация БВМ на ПЛИС с технологией софт-процессоров также имеет ряд преимуществ:

1. Возможность реализации многопроцессорной архитектуры (в рассматриваемом случае 2 процессора) позволила распределить вычислительные задачи по ядрам.

2. Открытая процессорная архитектура позволила реализовать необходимую вспомогательную периферию (таймеры, счетчики, интерфейсы связи), в том числе высокопроизводительный интерфейс связи [4] с периферийными модулями системы управления.

3. Применение специализированного математического сопроцессора позволило существенно снизить время расчета сложных арифметических вычислений за счет использования аппаратных инструкций и специальных вычислительных блоков. В случае применения проприетарного арифметического блока DFPAU-DP (Floating Point Arithmetic Coprocessor – Double Precision) от Digital Core Design [5] увеличение скорости может быть довольно существенным, рис. 4.

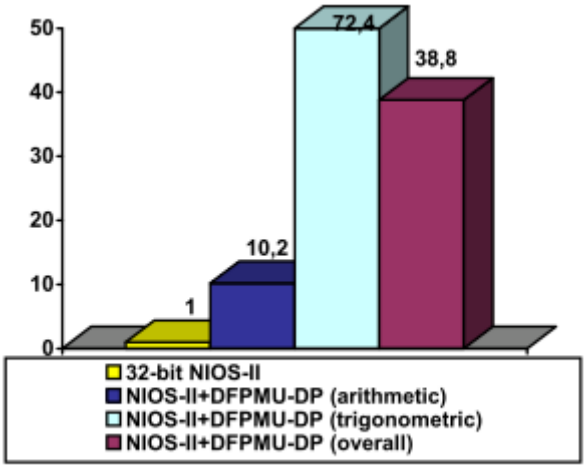


Рис. 4. Увеличение скорости вычислений при использовании математического блока DFPAU-DP, раз

Такой подход позволяет реализовать специальный вычислительный блок решения как прямой и обратной задачи кинематики, так и прямой и обратной задачи динамики [6], в случае применения системы для управления объектом со сложной кинематической структурой (5-осевой обрабатывающий центр или промышленный манипулятор).

4. Возможность совершенствования архитектуры (топологии ПЛИС) и программной составляющей без замены аппаратного обеспечения и микросхем.

Кроме выполнения задач ЧПУ в БВМ, как было сказано выше, реализован Soft ПЛК для решения задачи управления электроавтоматикой технологического оборудования. Помимо стандартных компонентов электроавтоматики станков и роботов (система охлаждения, система смены инструмента, смазка направляющих, подача СОЖ и др.) зачастую требуется применение специализированного оборудования, например: система безопасности и защиты оператора станка («нулевая защита»), специализированные измерительные инструменты, системы поддержания требуемых режимов технологии обработки (плазма, электроэрозия, гидроабразив) и т.д. Эти задачи требуют специализированных элементов управления, которые бы работали в полуавтономном режиме и не вносили бы существенных задержек в основной алгоритм управления при исполнении команд центрального элемента управления и предоставлении для него входной информации в «удобном» виде.

Для решения задачи управления электроавтоматикой согласно модульному принципу построения системы были разработаны и произведены стандартные и специализированные периферийные модули, в том числе:

— модуль дискретных входов/выходов 24В (16/16);

— модуль аналоговых входов/выходов +10/-10В (6/6);

— модуль дифференциальных входов/выходов (16 каналов).

Периферийные модули системы управления выполнены на основе ПЛИС технологии CPLD [7] без применения софт-процессоров, рис 5. Однако для решений, где необходимы сложные вычисления, потенциально возможно применение ПЛИС технологии FPGA с возможностью реализации процессорной архитектуры, как в центральном элементе системы, рис. 6.

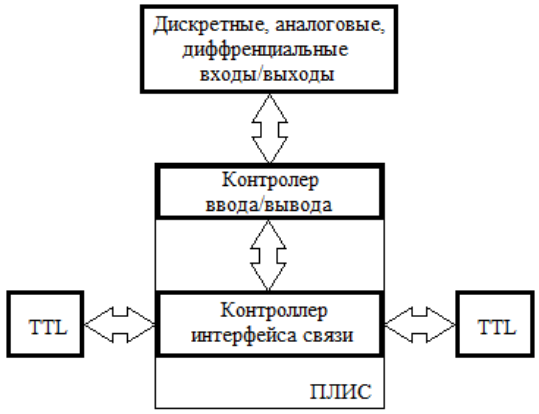


Рис. 5. Архитектура стандартного периферийного модуля системы управления без использования софт-процессора

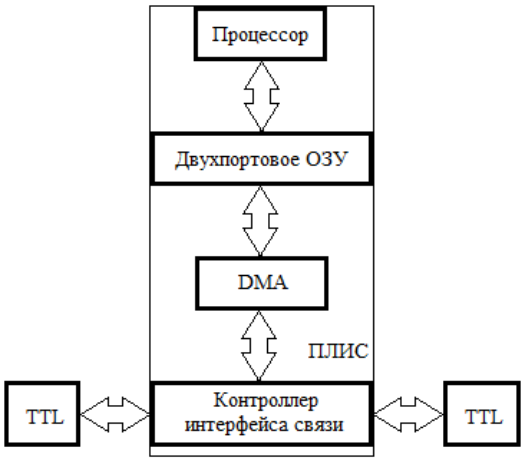


Рис. 6. Архитектура периферийного модуля системы управления с использованием софт-процессора

Такой принцип построения системы управления позволяет осуществить распределенные вычисления в отдельных элементах системы.

Программирование ПЛК осуществляется на собственном языке, также есть возможность программирования на языке ST (структурированный текст) и IL (список инструкций), которые являются стандартными языками программирования ПЛК по стандарту МЭК (IEC 61131-3) [8].

Для синхронизации данных между центральным и периферийными модулями системы был разработан высокопроизводительный интерфейс и протокол связи [4]. Модули соединяются по топологии «кольцо», при этом обработка входящих данных, проверка и обновление контрольной суммы и отправка данных следующему модулю производится за 1 такт в каждом из периферийных модулей. Такой принцип передачи данных стал возможен благодаря применению ПЛИС в составе модулей и обеспечил минимальные задержки (1 такт = 20нс) в каждом «ведомом» (slave) участнике сети. В БВМ, который является «ведущим» (master) участником сети, реализован аппаратный (в топологии ПЛИС) контроллер сети со специализированным модулем прямого доступа к памяти (DMA). Этот факт позволил исключить поддержку протокола из основного цикла программы, поскольку алгоритм реализуется на аппаратном уровне.

Для примера рассчитаем время синхронизации данных для набора из четырех стандартных модулей (4 байта) и одного специализированного (16 байт). Время синхронизации данных с учетом служебной информации и задержек в канале ведущего и ведомых составляет 1,56 мкс. Микросекундный и субмикросекундный цикл опроса позволяет получать актуальные данные с датчиков и эффективно управлять исполнительными механизмами. Разработанный интерфейс совместим с интерфейсом RMII приемопередающих устройств Ethernet, это дает возможность для реализации промышленного Ethernet «реального времени» (RT Industrial Ethernet), такого как EtherCAT, Sercos III и др.

Заключение

В качестве итогов можно сказать, что была разработана комплектная система ЧПУ, эффективно управляющая станками со сложной кинематикой и робототехническими комплексами. Ядро системы реализовано на многопроцессорной архитектуре, интегрированной в топологию ПЛИС. Применение специализированных аппаратных инструкций и распределение вычислений по ядрам архитектуры позволило существенно снизить время расчетов. Реализованный в ядре системы программный ПЛК, а также высокопроизводительный интерфейс и протокол связи между модулями системы дают возможность для эффективного управления сложной электроавтоматикой станочного оборудования и автоматизированных линий.

Система была успешно испытана на станках ведущих станкостроительных предприятий РФ, таких как СА-535 компании «САСТА», КВС-В4 компании «КЭМЗ» и S500M компании Группа «СТАН».

Литература

1. Cyclone IV Device Handbook / [Электронный ресурс] Режим доступа свободный URL https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyclone4-handbook.pdf.

2. Nios II Processor Reference Guide / [Электронный ресурс] Режим доступа свободный URL https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/hb/nios2/n2cpu-nii5v1gen2.pdf.

3. Latency of Raspberry Pi 3 on Standard and Real-Time Linux 4.9 Kernel / [Электронный ресурс] Режим доступа свободный URL https://medium.com/@metebalci/latency-of-raspberry-pi-3-on-standard-and-real-time-linux-4-9-kernel-2d9c20704495.

4. Распределенная система управления электроавтоматикой станков, промышленных роботов и автоматизированных комплексов на основе высокопроизводительного интерфейса связи / М.А. Харьков, С.П. Ивановский, А.А. Зеленский, Т.Х. Абдуллин // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. №1. С. 91–95.

5. Floating Point Coprocessor Double Precision ver 3.03 / [Электронный ресурс] Режим доступа свободный URL http://dtsheet.com/doc/740069/dcd-dfpmu-dp.

6. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника. М.: Мир, 1989.

7. MAX II Device Handbook / [Электронный ресурс] Режим доступа свободный URL https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/hb/max2/max2_mii5v1.pdf.

8. ГОСТ Р МЭК 61131-3-2016, Контроллеры программируемые. Часть 3. Языки программирования. М.: Издательство стандартов, 2016.

Поступила 07.08.2018; принята к публикации 11.09.2018

Информация об авторах

Зеленский Александр Александрович – канд. техн. наук, проректор по научной работе и научно-технической политике, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», (127055, Россия, г. Москва, Вадковский пер., 1), тел. +7(499)-972-95-21, e-mail: science@stankin.ru

Харьков Михаил Александрович - аспирант кафедры «Высокоэффективные технологии обработки», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», (127055, Россия, г. Москва, Вадковский пер., 1), тел. +7(917)-525-31-27, e-mail: facejr@yandex.ru
Ивановский Станислав Павлович - канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», (127055, Россия, г. Москва, Вадковский пер., 1), тел. +7(916)-496-84-35, e-mail: ivanovsky@stankin.ru
Абдуллин Тагир Хабибович - аспирант кафедры «Высокоэффективные технологии обработки», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», (127055, Россия, г. Москва, Вадковский пер., 1), тел. +7(915)-211-37-75, e-mail: everestultimate@yandex.ru

HIGH-PERFORMANCE NUMERICAL CONTROL SYSTEM BASED ON PROGRAMMABLE LOGIC DEVICES

A.A. Zelenskiy, M.A. Khar'kov, S.P. Ivanovskiy, T.Kh. Abdullin

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moskow, Russia

Abstract: the paper presents a developed complete system for numerical control of machines with complex kinematics, industrial robots and automated complexes. The control system has a modular structure. Calculations in the control system are distributed over composite modules. The software core of the system is implemented on a multiprocessor architecture integrated into the topology of the programmable logic integrated circuit. This approach has some significant advantages. Researches have shown that the implementation of a software core run by the operating system significantly increases the response time of the system to external events and reduces fault tolerance. For this reason, the core works without the use of an operating system (bare metal) in the control system. The use of specialized hardware instructions and the distribution of calculations for the architecture cores made it possible to significantly reduce the calculation time. The programmable logic controller implemented in the core of the system, as well as the developed high-performance interface and the communication protocol between the modules of the system make it possible to effectively control the complex electroautomation of machine equipment and automated lines. The system was successfully tested on the machines of the leading machine-building enterprises of the Russian Federation and is a contribution to ensuring the technological independence of the state

Key words: numeric control, distributed computations, high-performance interface and communication protocol

References

1. Cyclone IV device handbook, available at: https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyclone4-handbook.pdf.
2. Nios II processor reference guide, available at: https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/hb/nios2/n2cpu-nii5v1gen2.pdf.
3. Latency of raspberry Pi 3 on standard and real-time Linux 4.9 Kernel, available at: https://medium.com/@metebalci/latency-of-raspberry-pi-3-on-standard-and-real-time-linux-4-9-kernel-2d9c20704495.
4. Khar'kov M.A., Ivanovskiy S.P., Zelenskiy A.A., Abdullin T.Kh. "Distributed control system for the electroautomatics of machine tools, industrial robots and automated complexes based on a high-performance communication interface", The Bulletin of MSTU "STANKIN" (Vestnik MGTU "STANKIN"), 2018, no.1, p.91-95.
5. Floating point coprocessor double precision ver 3.03, available at: http://dtsheet.com/doc/740069/dcd-dfpmu-dp.
6. Fu K.S., Gonsales R., Lee C.S.G. "Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence", Russian ed.: Moscow, Mir, 1989
7. MAX II device handbook, available at: https://www.intel.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/hb/max2/max2_mii5v1.pdf.
8. GOST 61131-3-2016 "Programmable controllers. Part 3. Programming languages" ("Kontrollery programmiruemye. Chast' 3. Yazyki programmirovaniya"), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2016

Submitted 07.08.2018; revised 11.09.2018

Information about the authors

Aleksandr A. Zelenskiy, Cand. Sc. (Technical), Vice-rector for scientific work and scientific-technical policy of Moscow State University of Technology «STANKIN» (1 Vadkovskiy lane, Moskow 127055, Russia), tel. +7(499)-972-95-21, e-mail: science@stankin.ru
Mikhail A. Kharkov, Graduate student, Moscow State University of Technology «STANKIN» (1 Vadkovskiy lane, Moskow 127055, Russia), tel. +7(917)-525-31-27, e-mail: facejr@yandex.ru
Stanislav P. Ivanovskiy, Cand. Sc. (Technical), Leading scientific researcher of Moscow State University of Technology «STANKIN» (1 Vadkovskiy lane, Moskow 127055, Russia), tel. +7(916)-496-84-35, e-mail: ivanovsky@stankin.ru
Tagir Kh. Abdullin, Graduate student, Moscow State University of Technology «STANKIN» (1 Vadkovskiy lane, Moskow 127055, Russia), tel. +7(915)-211-37-75, e-mail: everestultimate@yandex.ru

УДК 004.8, 004.94, 51-74, 621.37

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ РТК НА ОСНОВЕ АППАРАТНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В.Ж. Бочаров[1], В.Л. Бурковский[2]

[1]ЗАО МГК «Интехрос», г. Воронеж, Россия
[2]Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена универсальная система управления, представленная сложным робототехническим комплексом. Для системы управления такого объекта, как РТК важно решение проблемы управления в сложных условиях различных внешних возмущений, включая быстрые изменения управляющих воздействий. В рамках решения этих проблем от системы управления потребуется не только гибкость и надежность, но и возможность самообучаться по мере эксплуатации. Решением в этом случае будет рассмотренное ранее применение системы гибридного параллельного нейроуправления, которое подразумевает использование сразу двух контроллеров: обычного и нейронного. В статье приведены классическая схема, иллюстрирующая гибридное параллельное нейроуправление, и уже переработанная схема, применимая для управления РТК. Проиллюстрированы нейронные сети пространственных слоев нейроконтроллера. Подход к разработке систем управления такими объектами, как РТК в рамках сложных систем, описанный в статье, позволяет значительно повысить общую эффективность объекта управления и уменьшить количество проблем, возникающих при эксплуатации подобных систем

Ключевые слова: нейроуправление, робототехнический комплекс, ПЛК, нейронные сети, оптимизация

Введение

В современных реалиях хозяйственной деятельности людей все большее значение приобретает автоматизация и роботизация не только опасных, монотонных операций, но и вообще любых действий. Обычные узкоспециализированные РТК зачастую неспособны справиться с широким спектром задач, в результате чего приходится либо использовать широкую номенклатуру различной техники, либо искать какое-то универсальное решение. Очевидно, что при следовании пути унификации и универсализации сложность самих РТК, равно как и их систем управления, значительно возрастает. Приходится решать не только вопросы, например позиционирования исполнительных механизмов, но и адекватной реакции на внешние возмущающие воздействия, изменения, вызванные другой областью применения РТК и т.д. В рамках данной статьи для упрощения решения задачи разработки сложной системы управления в качестве объекта управления можно рассмотреть РТС РОИН Р-300.

Данный РТК способен решать достаточно широкий спектр задач: транспортировка грузов массой до 3 тонн; операции по демонтажу железобетонных конструкций; землеройные операции; операции по разминированию; операции по бурению скважин глубиной до 3 метров. Очевидно, что такие различные по технологической реализации и сложности задачи выдвигают большие требования к системе управления.

Основная часть

Рассмотрение системы управления РТС РОИН Р-300 стоит начать с рассмотрения самого РТК, как объекта управления. РТС Р-300 представляет из себя автономную многоцелевую дистанционно-управляемую машину модульного типа для выполнения широкого спектра инженерных задач. РТС оборудовано НПУ (наклонно-поворотным устройством), которое обеспечивает повышенную маневренность рабочего органа, позволяет вращать и наклонять навесное оборудование независимо от положения манипулятора. Также НПУ обеспечивает работу с широким спектром навесного оборудования и его быструю смену.

Основой энергетической установки РОИН РТС Р-300 является ДВС мощностью 40 л.с., а исполнительные органы РТК приводятся в движение посредством гидравлических цилиндров. Система управления представлена рядом электронных блоков управления, объединенных в единую проводную сеть на основе интерфейса RS-485. Блоки управления связаны с пультом дистанционного управления оператора посредством радиоканала. В базовой

© Бочаров В.Ж., Бурковский В.Л., 2018

конфигурации РОИН РТС Р-300 обладает лишь одной полностью автоматической функцией — автоматическим горизонтированием.

Как говорилось выше — наша задача реализовать полное автоматическое управление РТК в применении к нескольким задачам: транспортировка грузов массой до 3 тонн; операции по демонтажу железобетонных конструкций; землеройные операции; операции по разминированию; операции по бурению скважин глубиной до 3 метров.

Аппаратно-электронные блоки управления строятся вокруг микроконтроллеров STM32F103. Эти процессоры обладают высокой вычислительной мощностью и большими возможностями по работе с периферией. В условиях рассматриваемых в статье задач данный факт — несомненное преимущество.

Архитектура

В рамках решения поставленных задач предполагается использовать уже проверенную и хорошо описанную в статьях ранее и доработанную архитектуру параллельного гибридного нейроуправления.

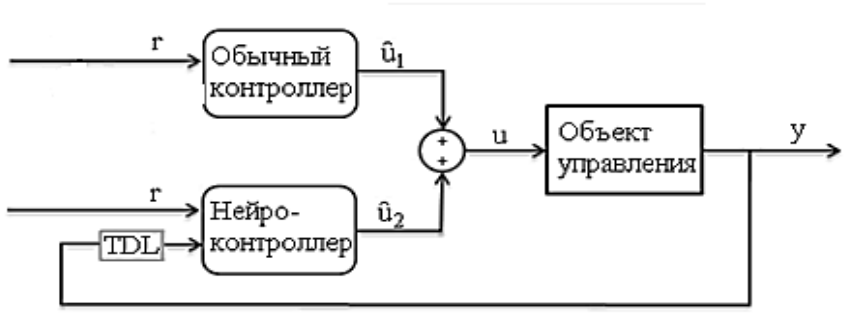


Рис. 1. Архитектура системы управления

Применение подобной архитектуры дает значительное преимущество в сравнении с классическим нейроуправлением или системами управления вообще без нейронных сетей. В рамках аппаратной реализации данной архитектуры необходимо дооснастить каждый существующий блок управления дополнительным контроллером STM32F103, который как раз и возьмет на себя функции нейроконтроллера. Фактически параллельно обычной системе управления строится ее нейросетевая версия.

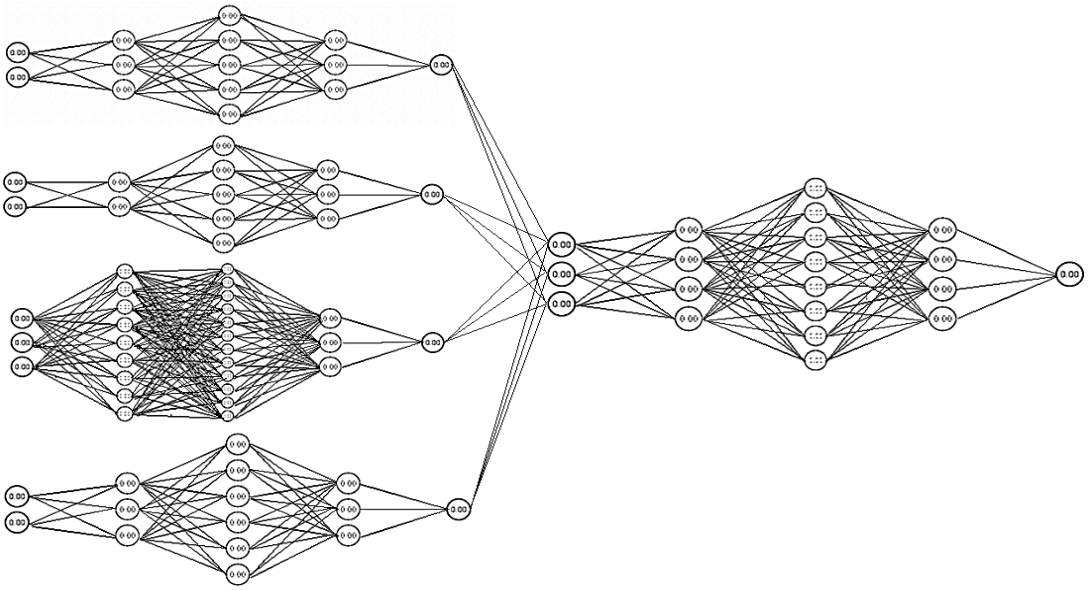


Рис. 2. Обобщенная нейронная сеть системы управления

Как и в ранее описанных подходах [1], нейронная сеть системы управления предполагается 3D нейронной сетью. Этот метод позволит решить большой спектр локальных проблем, которые возникнут перед системой управления РОИН РТС Р-300: расширение функциональных возможностей системы управления; понижение чувствительности к возмущающим внешним воздействиям (радиационное излучение, электромагнитные помехи, неблагоприятные погодные условия, негативные температурные воздействия и т.д.); адаптация к количественным и качественным изменения в системе управления; значительное увеличение быстродействия. Как следствие — увеличивается общая надежность и отказоустойчивость РТК. Несмотря на значительное улучшение системы управления, предпринятых шагов недостаточно. Данные действия хоть и позволят значительно автоматизировать базовые функции РОИН РТС Р-300, но совсем не позволят добиться автономности от оператора с пультом управления. То есть, если рассматривать внесенные изменения и их эффект по существу, оператору теперь необходимо формировать ряд последовательных базовых команд, контроль и осуществление которых берет на себя гибридная система управления. Чтобы прийти к заявленным в статье целям и реализовать действительно систему управления на основе аппаратного искусственного интеллекта, необходим еще один значительный шаг вперед — техническое зрение.

Техническое зрение

Очевидно, что если систему управления научить «видеть» различные объекты вокруг РТК, то можно значительно расширить степень автоматизации всей системы управления и значительно уменьшить нагрузку на оператора, сведя по сути к обязанностям оператора лишь выбор обобщенной программы действий для РТК [2]. Машинное зрение, с точки зрения затрат вычислительных мощностей — сложная операция. Элементной базы, на которой строятся блоки управления, недостаточно для сколько-нибудь быстродействующей системы распознания хотя бы для одной аналоговой или цифровой камеры видеонаблюдения. Наш же объект управления — РОИН РТС Р-300 — оснащается 4 камерами и двумя поворотными устройствами к ним. Решением в данном случае будет перенос вопросов применения технического зрения полностью на нейронные сети, а еще точнее - на фасетные нейронные сети. Для этого можно дооснастить систему управления РТК дополнительным блоком, укомплектованным несколькими нейро-контроллерами. Этот блок также включить в бортовую сеть RS-485 и сделать частью общей нейронной сети системы управления.

Фасетные нейронные сети строятся на принципах, аналогичных устройству зрения у некоторых видов насекомых. Данный метод подразумевает, что в нашей реализации изображение с камер проходит большое количество фильтров, делится на небольшие участки, которые распознаются и формируют общую картинку. С получившейся картиной и сможет работать система управления [3].

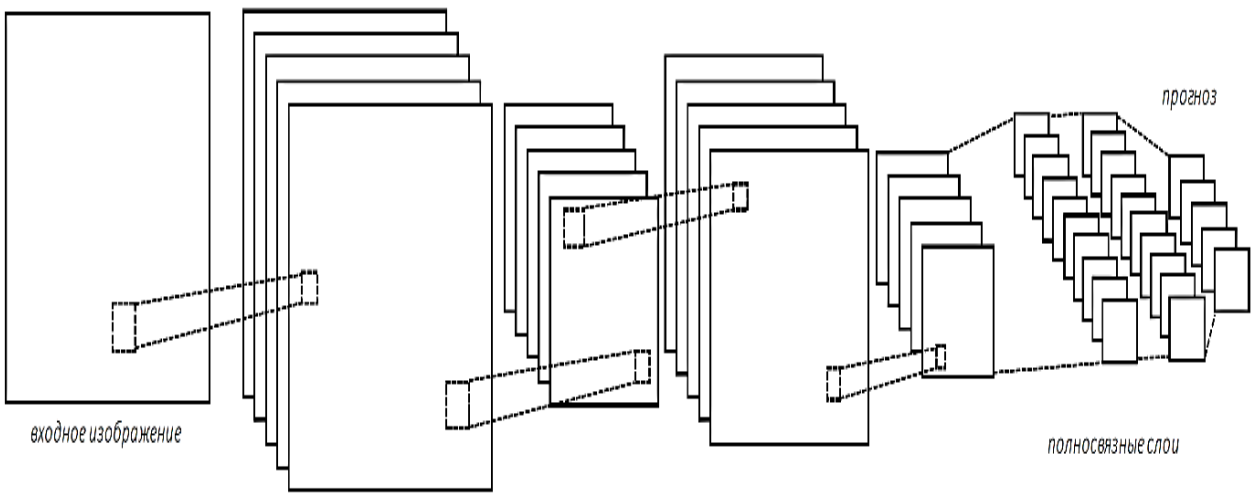


Рис. 3. Принцип работы фасетной нейронной сети распознания образов

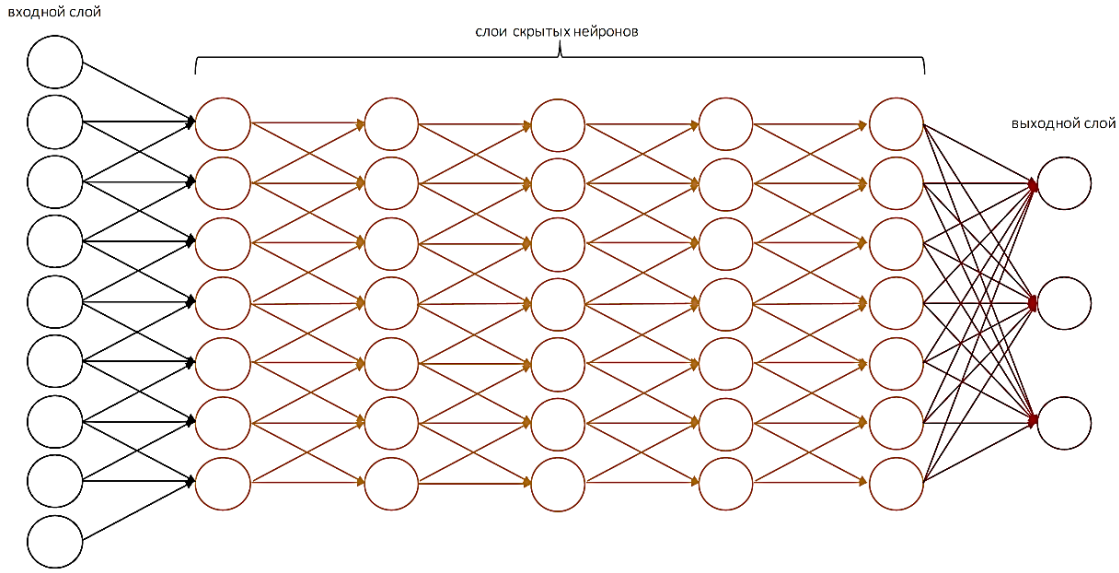


Рис. 4. Структурная схема нейронной сети машинного зрения

После завершения работы нейронной сети машинного зрения данные ее выходных слоев передаются уже существующей системе управления и используются для корректирования действий всей системы управления. Большим преимуществом подобного подхода является возможность значительно сократить номенклатуру применяемых датчиков. Фактически пространственное положение и его определение теперь можно проводить без угловых датчиков положения и датчиков линейного перемещения. Таким образом мы достигаем еще и экономического эффекта: меньшими по затратам средствами достигается более высокое быстродействие.

Заключение

Таким образом, полученная система управления значительно в лучшую сторону отличается и от «классической» системы управления, и от системы управления с дополнительными нейроконтроллерами. Эффект достигается использованием технического зрения и параллельного гибридного нейроуправления. Перечислим основные преимущества полученной системы управления:

1. Функционирование системы управления в условиях автономной работы и максимальной автоматизации операций, осуществляемых РОИН РТС Р-300.
2. Повышенная защита от внешних негативных воздействий различного рода: радиация, помехи, осадки, ветровая нагрузка и т.д.
3. Высокая степень адаптации. Благодаря техническому зрению система управления, а значит, РТК в целом, значительно проще приспосабливается к изменениям рабочих условий.
4. Повышенное быстродействие.
5. Повышение отказоустойчивости и общей надежности.

Литература

1. Бочаров В.Ж., Бурковский В.Л. Система нейроуправления на основе 3D-сети в условиях робототехнического комплекса специального назначения // Вестник государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 39-45.

2. Колтыгин Д.С. Аппаратно-программное обеспечение дистанционного управления, идентификации и диагностики робототехнических комплексов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Иркутск, 2004. 25 с.

3. Корепанов С.Е. Алгоритм обработки изображений в системе технического зрения для относительной навигации летательных аппаратов при дозаправке в воздухе // Техническое зрение [Электронный ресурс]. 2016. № 1. С. 18-23.

Поступила 31.05.2018; принята к публикации 10.09.2018

Информация об авторах

Бочаров Владимир Жанович — инженер-конструктор, ЗАО МГК «Интехрос» (394019, Россия, г. Воронеж, ул. Торпедо, 43 «А»), бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bocharov@intehros.ru
Бурковский Виктор Леонидович — д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvl@vorstu.ru

STRUCTURE OF THE CONTROL SYSTEM OF COMPLEX RTC BASING ON HARDWARE-CONTROLLED ARTIFICIAL INTELLIGENCE

V.Zh. Bocharov[1], V.L. Burkovskiy[2]

[1]CC MGC "Intehros", Voronezh, Russia
[2]Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers a multipurpose control system, represented by a complicated robotic complex. For the control system of an object such as the RTC, it is important to solve the control problem in the difficult conditions of various external disturbances, including rapid changes in control actions. As part of solving these problems, a control system will require not only flexibility and reliability, but also the ability to self-learn as it operates. The solution in this case will be the previously considered application of the hybrid parallel neurocontrol system, which involves the use of two controllers at once: normal and neural. The article presents a classic diagram illustrating hybrid parallel neurocontrol, and an already revised scheme applicable for controlling the RTC. Neural networks of the spatial layers of the neurocontroller are illustrated. The approach to the development of control systems for such objects as the RTC within the framework of complex systems described in the article can significantly increase the overall efficiency of the control object and reduce the number of problems arising during operation of such systems

Key words: neural control, robotic complex, PLC, neural networks, optimization

References

1. Bocharov V.Zh., Burkovskiy V.L. “System of neural control on the basis of a 3D network in the conditions of a special-purpose robotic complex”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 39-45.
2. Koltygin D.S. “Hardware and software for remote control, identification and diagnostics of robotic complexes. Cand. tech. sci. diss.” (“Apparatno-programmnoe obespechenie distantsionnogo upravleniya, identifikatsii i diagnostiki robototekhnicheskikh kompleksov: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk”), Irkutsk State University of Communications, 2004, 152 p.
3. Korepanov S.E. “Algorithm for processing images in the system of technical vision for the relative navigation of aircraft during refueling in the air”, Electronic Scientific and Technical Journal "Technical Vision" (Tekhnicheskoe zrenie. Elektronnyy zhurnal]), 2016, no. 1, pp. 18-23.

Submitted 31.05.2018; revised 10.09.2018

Information about the authors

Vladimir Zh. Bocharov, Design engineer, CC MGC "Intehros" (43 "A" Torpedo st., Voronezh 394019, Russia), MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bocharov@intehros.ru
Viktor L. Burkovsky, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru

УДК 004.4

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО КРОССПЛАТФОРМЕННОГО МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

В.Н. Черников, С.Л. Подвальный, В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описана методика проектирования кроссплатформенных мобильных приложений на основе пользовательского интерфейса. Выполнен анализ процедуры разработки программного обеспечения и определен перечень проблем, наиболее часто возникающих перед командой разработчиков и обусловленных спецификой мобильных бизнес-приложений. На основании выявленного списка проблем рассмотрен процесс разработки программного обеспечения с целью выявления ключевых этапов, оказывающих наибольшее влияние на скорость и качество кодирования и тестирования. Предложен подход, основанный на визуализации последовательности переходов пользователя между страницами приложений, и описан процесс предварительной подготовки технической документации, который должен выполняться самими кодировщиками и тестировщиками с целью унификации процесса разработки и использования единых терминов и обозначений в технической документации и программном коде. Даны методические рекомендации по созданию структуры кроссплатформенных мобильных приложений на основе описанной технической документации. Описанная в статье методика позволяет провести техническое проектирование силами разработчиков и тестировщиков, получив необходимую для кодирования и тестирования информацию в удобном и наглядном формате. Предложенный подход позволяет добиться значительного сокращения трудозатрат на разработку и поддержку программного продукта

Ключевые слова: кроссплатформенная разработка, мобильные приложения, методика разработки

Введение

Во время разработки программного обеспечения необходимо учитывать интересы сразу нескольких групп участников: бизнес-заказчики, проектировщики, тестировщики, разработчики и дизайнеры. Спецификой мобильных бизнес-приложений является их невысокая сложность в сравнении с корпоративным backend-сервисами - минимум бизнес-логики и относительно простой пользовательский интерфейс.

Во время развития проекта команды могут столкнуться со следующими проблемами [1]:

1. Отсутствие или несоблюдение архитектурных паттернов, которое ведет к хаотичному расположению файлов в структуре решения. Также создаются излишние связи между классами и подсистемами. Все это усложняет и замедляет развитие продукта, так как требуется много времени на распутывание подобных связей.
2. Сложность работы с проектной документацией – документация, выполненная по нормативам, содержит относительно мало информации для программистов, информация подается в сложном для запоминания формате.
3. Отсутствие единой документации (кроме Технического задания, далее ТЗ) для всей команды, которая бы позволила находить общий язык и при этом была достаточно компактной и простой для восприятия. “Документация отдельно, код отдельно” - редко обозначения и названия из документации используются в коде, что усложняет его разработку и развитие.

В данной статье будет описан пошаговый процесс подготовки технической документации, которая позволит создать структуру проекта на основе пользовательского интерфейса. Также будет описан необходимый минимум электронных документов, на которые могут в дальнейшем опираться участники команды разработки.

1. Первичная документация

Ключевой тезис, лежащий в основе представленной методики:

Мобильные бизнес-приложения — это в первую очередь пользовательский интерфейс для взаимодействия с внешним Интернет-сервисом.

При разработке технической документации на проект это стоит учитывать, так как интерфейс нагляден и на его основе проще проводить декомпозицию. Также стоит учитывать, что модель предметной области также может быть описана на основе пользовательского интерфейса - в модели необходимо учитывать в основном те данные (и их производные), которые вводятся пользователем, отображаются на

© Черников В.Н., Подвальный С.Л., Барабанов В.Ф., Нужный А.М., 2018

экране и управляют его поведением. Бизнес-сценарии также напрямую завязаны на поведение пользовательского интерфейса [2].

В то же самое время большинство ТЗ готовится для бизнес-заказчиков и описывают не отдельные экраны или классы, а целые бизнес-сценарии и блоки функциональности. В дальнейшем эта документация и спецификации дизайна используются командой разработки. Так как эта информация не структурирована с точки зрения разработчиков, то на этапе кодирования приходится много раз повторно перечитывать документацию для составления полной модели продукта.

Прежде чем перейти к анализу документации и извлечению из нее полезных данных, следует рассмотреть весь процесс разработки целиком. Для простоты будет рассмотрен линейный процесс разработки, так как при использовании циклических или спиральных процессов возникают те же самые классы задач, только последовательность их выполнения может отличаться [3].

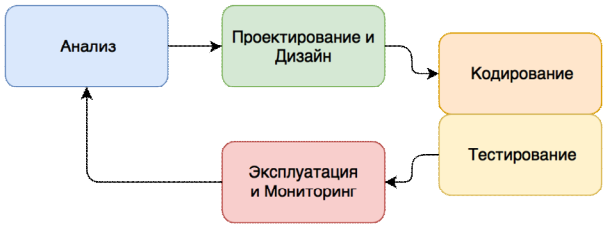


Рис. 1. Циклический процесс разработки

Итак, у проекта обычно выделяют следующие производственные классы задач:

- анализ;
- проектирование и дизайн;
- кодирование;
- тестирование;
- эксплуатация.

На этапе аналитики производится поиск решения, описание общих требований к приложению. На выходе с этапа аналитики появляются спецификации, которые являются вводными для этапа проектирования.

Дальше осуществляется проектирование пользовательского интерфейса. Этот этап является ключевым и при правильном подходе очень упрощает процесс разработки.

Дизайн фактически является производным от схем экранов и наполняет изначальные схемы эмоциями, выправляет композицию, добавляет анимации и другие аспекты внешнего вида и визуального поведения. Схемы экранов, в свою очередь, создают структуру приложения и моделей данных - какие данные отображать, как они будут сгруппированы, как они будут влиять на поведение интерфейса.

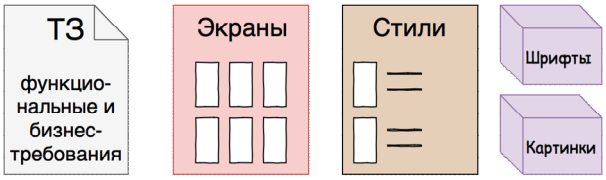


Рис. 2. Типовые документы для этапа разработки

На выходе с этапа проектирования будет получен комплект необходимых спецификаций и ресурсов (шрифты, графические файлы), которые вместе с ТЗ будут использоваться разработчиками. Этап кодирования разумно начинать с построения фундамента – базовой структуры проекта.

2. Экраны, данные и логика

Так как мобильные приложения это, в первую очередь, пользовательский интерфейс, проектирование лучше начинать со схем экранов и последовательности переходов между ними [3,4]. Это необходимо для того, чтобы определить набор шагов, которые предстоит пройти пользователю для получения желаемого результата. Ведь бизнес-приложение создается для определенного набора ключевых сценариев (последовательности действий пользователя), с помощью которых человек может решить свои задачи, как это показано на рис. 3.

Поскольку среднее время контакта человека со смартфоном составляет всего несколько минут, то количество шагов в бизнес-приложениях не должно быть большим - для пользователя в первую очередь важно получить результат (выполнить задачу или удовлетворить потребность) за время контакта с устройством. Для сложных приложений с большим количеством функциональных возможностей следует учитывать этот фактор.

Для того, чтобы определить глубину ключевых сценариев, можно использовать карту переходов и состояний, которая будет описана в разделе 2.3. Но для начала требуется привести в порядок структуру интерфейса.

2.1. Группировка экранов и сквозное именование

Чтобы разбить приложение на части (разделы предметной области), следует начать со структуры пользовательского интерфейса.

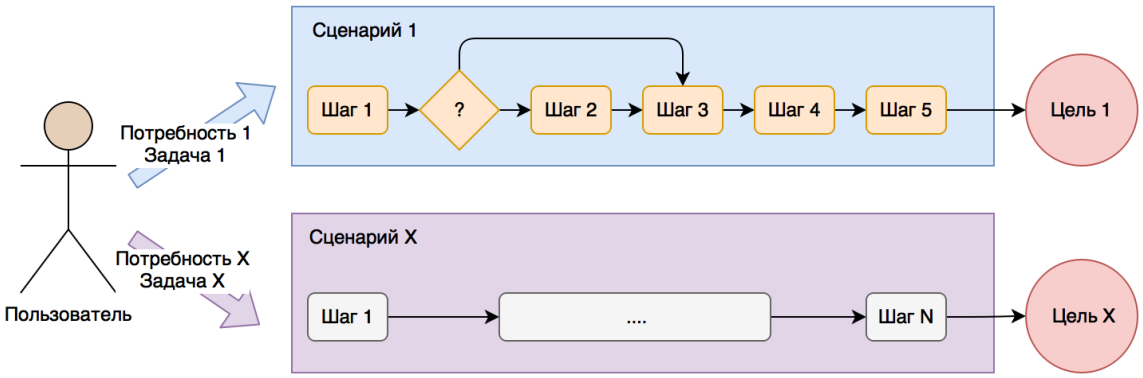


Рис. 3. Пользовательские бизнес-сценарии

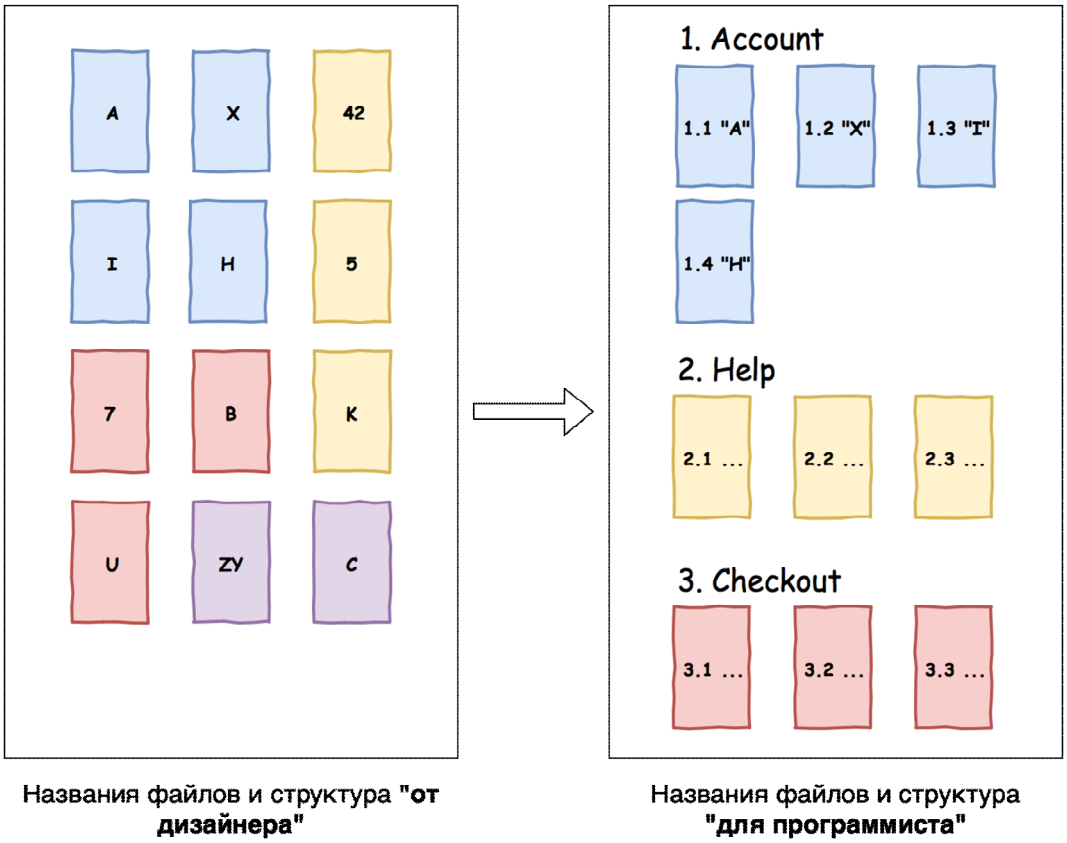


Рис. 4. Структурирование дизайна экранов

На рис. 4 показан процесс группировки экранов. Первым шагом необходимо выделить экраны, которые связаны между собой, обычно они должны идти друг за другом в пользовательских сценариях. Например, часто в приложениях можно выделить раздел Account с просмотром и редактированием всей информации, связанной с профилем пользователя.

Например, могут получиться следующие разделы:

1. Account
2. Help
3. Checkout
4. Catalog

Каждый раздел должен иметь название и номер. Названия разделов следует использовать для горизонтальной декомпозиции слоев работы с данными, бизнес-логики и пользовательского интерфейса.

Слой работы с данными (группы методов для различных серверных API; Data Access Layer, DAL) в этом случае разделится на соответствующие сервисы, каждый из которых будет обслуживать свой набор экранов:

DAL\DataServices
AccountDataService.cs
HelpDataService.cs

CheckoutDataService.cs
CatalogDataService.cs

В дальнейшем каждый из сервисов может полностью инкапсулировать всю логику работы с Интернет-сервером, дисковым кешем и локальной СУБД. Это позволит на уровне бизнес-логики работать с данными сервисами как с черными ящиками.

Далее необходимо пронумеровать и назвать экраны (страницы, окна). На выходе должна получиться древовидная структура интерфейса без учета последовательности переходов между экранами и их вложенности.

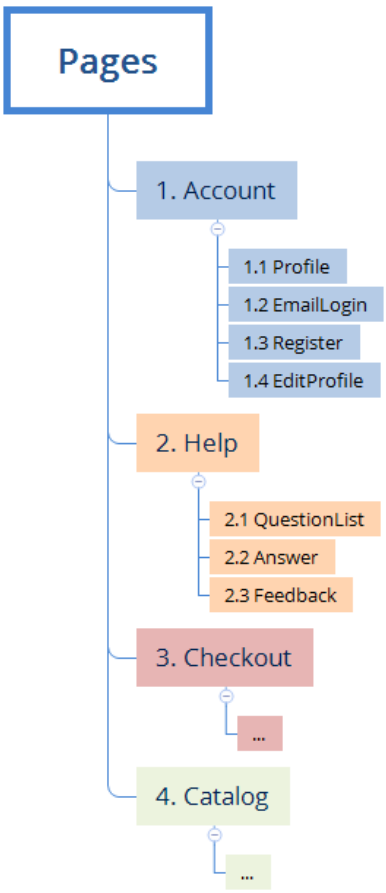


Рис. 5. Структура экранов по разделам

Имена экранов будут использоваться в названиях классов для соответствующих страниц и описания логики их поведения. При использовании паттерна MVVM и кроссплатформенного фреймворка Xamarin.Forms получатся следующие классы:

1.1 Profile
ProfilePage
ProfileViewModel

1.2 EmailLogin
EmailLoginPage
EmailLoginViewModel

В первую очередь это важно для разработчиков, которые фактически получают готовую структуру проекта:

- Слой доступа к данным разбивается на разделы приложения - создается структура Data Access Layer (DAL)
- Добавляются нужные Pages и ViewModels — это создает структуру слоев работы с пользовательским интерфейсом и бизнес-логикой.

Пример структуры проекта представлен ниже.

Слой UI (User Interface, пользовательский интерфейс)
\Pages
\Account
ProfilePage.xaml
...

Слой BL (Business Logic, бизнес-логика)
\ViewModels
\Account
ProfileViewModel.cs
...

Слой DAL (Data Access Layer, доступ к данным)
\DataObjects (Models)
ProfileObject.cs (ProfileModel.cs)
ProductObject.cs

...
\DataServices (Repositories)
AccountDataService.cs
...

Для того чтобы дальше реализовывать поведение экранов, нам потребуется дополнительная информация, поэтому продолжим знакомство с необходимой документацией.

2.2. Таблица экранов

Следующим рассматриваемым документом станет сводная таблица экранов, оперировать которой будут не только разработчики, но и тестировщики [5]. В сводной таблице легко собрать воедино всю текстовую информацию. Ключевыми столбцами таблицы являются (для каждого экрана используется своя строка в таблице):

1. Номер

2. Краткое название (Name)
3. Список возможных состояний (States)
4. Поля ввода для валидации (Validation)
5. Описание экрана и его поведения (Behavior)

В представленном наборе полей собрана та информация, которая позволит корректно реализовать и проверить работу каждого экрана в отдельности. Рекомендуется также каждому разделу присвоить свой цвет — это упростит работу с картой переходов и состояний. Пример сводной таблицы экранов показан на рис. 6.

	A	B	C	D	E	F
1		**Name**	**States**	**Validation**	**Behavior**	**AutomationId**
2	**1**	**Account**				
3	1.1	Profile	Loading Normal NoInternet NoData		Необходимо отобразить краткую информацию о профиле, список последних уведомлений и активностей, а также текущий рейтинг.	EditButton
4	1.2	EmailLogin		Email (>5 and <160, default email mask) Password (>2 and <24, any chars)	Если пользователь ввел какое-либо неверное значение в поля "Ваш Email" и "Пароль" и нажал "Войти", то рядом с соответствующим полем должна отбразиться ошибка валидации. Если ошибок нет и пользователь нажал "Войти", то отображается всплывающий индикатор загрузки и в случае успешной авторизации осуществляется переход на экран 1.1 Profile. Если авторизоваться не удалось, то должен отобразиться соответствующий всплывающий диалог.	EmailField PasswordField LoginButton RegisterButton
5	1.3	Register		Email (>5 and <160, default email mask) Password (>2 and <24, any chars) Phone (12 digits, +X (XXX) XXX-XX-XX) FirstName (>2 any chars) LastName (>2 any chars)	Если пользователь ввел какое-либо неверное значение в поля "Ваш Email", "Пароль", "Телефон", "Имя", "Фамилия" и нажал "Зарегистрироваться", то рядом с соответствующим полем должна отбразиться ошибка валидации. Если ошибок нет и пользователь нажал "Зарегистрироваться", то отображается всплывающий индикатор загрузки и в случае успешной регистрации осуществляется переход на экран 1.1 Profile. Если зарегистрироваться не удалось, то должен отобразиться соответствующий всплывающий диалог.	EmailField PasswordField PhoneField FirstNameField LastNameField RegisterButton
6	1.3	EditProfile		Phone (12 digits, +X (XXX) XXX-XX-XX) FirstName (>2 any chars) LastName (>2 any chars)	Если пользователь ввел какое-либо неверное значение в поля "Телефон", "Имя", "Фамилия" и нажал "Сохранить", то рядом с соответствующим полем должна отбразиться ошибка валидации. Если ошибок нет и пользователь нажал "Сохранить", то отображается всплывающий индикатор загрузки и в случае успешного сохранения осуществляется переход на экран 1.1 Profile. Если обновить данные профиля не удалось, то должен отобразиться соответствующий всплывающий диалог.	PhoneField FirstNameField LastNameField SaveButton
7						
8	**2**	**Help**				

Рис. 6. Таблица экранов

Дополнительно в эту таблицу могут быть добавлены следующие столбцы:

6. Список всплывающих уведомлений (alerts, sheets, dialogs)
7. Идентификаторы элементов пользовательского интерфейса (например, LoginButton) для написания автоматизированных тестов
8. Используемые модели (Models/Data Objects) данных
9. Используемые на каждом экране методы DAL
10. Используемые стили (Styles)

О каждом экране по столбцам достаточно вписывать короткие обозначения, которые в дальнейшем будут использоваться в программном коде.

Отдельно остановимся на состояниях экранов. Большинство современных приложений работает через Интернет, поэтому стоит корректно отображать пользователю информацию о состоянии загрузки данных:

- отображать индикатор прогресса загрузки;
- отображать загруженные данные;
- отображать сообщение об отсутствии интернет-соединения;
- отображать сообщение об ошибке (недоступен сервер, ошибки сервера);
- отображать заглушку, если сервер вернул пустые данные (например, пустой список).

Пример различных состояний одного экрана показан на рис. 7.

Хорошей практикой считается, если каждый экран, загружающий данные из сети (или из локальной СУБД), будет корректно отображать пользователю каждое из описанных состояний. Фактически, отдельное состояние описывается своим набором визуальных элементов (тексты, изображения, кнопки, другие

элементы), и на уровне программного кода можно управлять переключением из одного состояния в другое. Также можно фиксировать негативные сценарии (ошибка загрузки, пустые данные) для дальнейшего анализа и устранения на стороне сервера или приложения.

На основе описанных данных можно создать структуру приложения, однако сейчас экраны описаны независимо друг от друга и нет зафиксированной последовательности переходов между ними. Поэтому следующим рассматриваемым документом станет карта переходов и состояний.

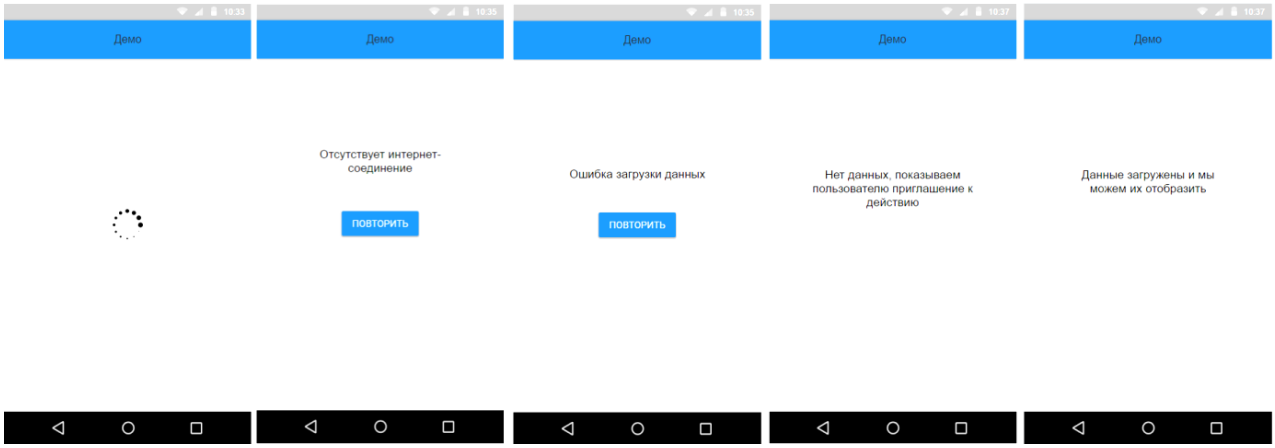


Рис. 7. Состояния экранов

2.3. Карта переходов и состояний

Для того чтобы выявить пользовательские сценарии, а также обозначить связи между экранами, следует использовать карту переходов и состояний. Плюсами карты являются ее компактность и наглядность.

Карта переходов начинается с точки старта – момента запуска приложения пользователем. Точек старта может быть несколько, например, один вариант запуска для авторизованного пользователя, второй – для неавторизованного, а третий – из Push-уведомления.

Далее добавляются прямоугольники для каждого экрана и обозначаются стрелками последовательности переходов. Можно добавить идентификаторы кнопок или событий, из-за которых произошел переход, и для наглядности еще указать данные, которые будут передаваться на новый экран. Пример карты переходов показан на рис. 8.

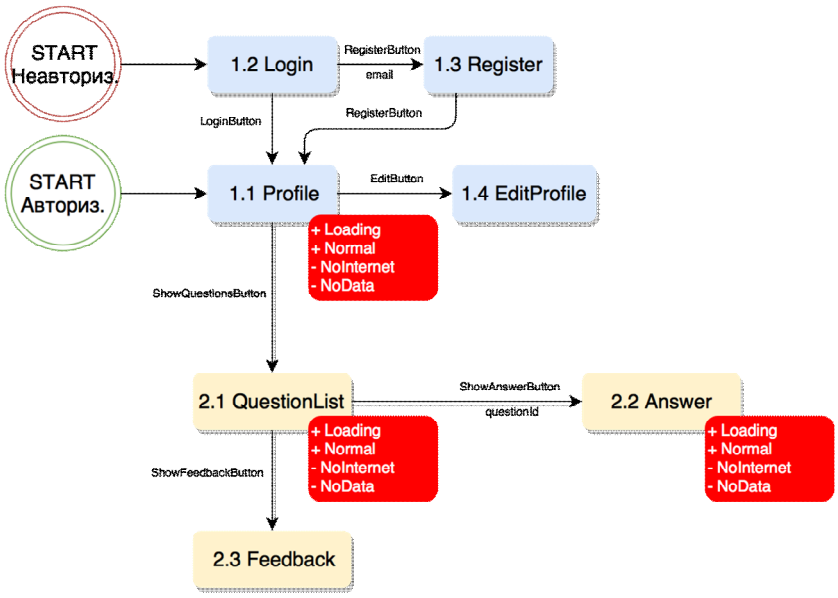


Рис. 8. Карта переходов

На карте переходов также необходимо указать возможные состояния экранов – это позволит лучше понять возможные прерывания пользовательских сценариев, например, в случае ошибок загрузки данных. Если состояние прерывает (пользователь не может перейти к следующему шагу) сценарий, то оно обозначается минусом «-», если не прерывает, то плюсом «+». Стрелочки “назад” для возврата на предыдущий экран можно не указывать.

2.4. Стили и ресурсы

В современных приложениях с пользовательским интерфейсом широко применяются таблицы стилей. В инструментах разработки (и в «нативных», и в кроссплатформенных) этот механизм также реализован, поэтому до старта кодирования необходимо сделать единую таблицу стилей, так как в противном случае есть высокий риск взрывного увеличения их количества, когда каждый разработчик придумывает свои имена для внешне одинаковых элементов пользовательского интерфейса. Чтобы этого избежать, необходимо заранее подготовить названия стилей с привязкой к дизайну.

Сама по себе информация по стилю должна приходить от дизайнера (например, через сервис Zeplin.io или приложение Sketch). Необходимо для всех объектов на экране указать названия связанных стилей.

На основе этой таблицы рекомендуется описывать необходимые стили на ранних этапах проекта, что позволит на этапе разработки сфокусироваться на компоновке, а не стилизации, элементов интерфейса.

3. Пользовательские сценарии

Как отмечалось в разделе 1, все приложения создаются для решения определенных пользовательских задач. То есть фактически это набор переходов между экранами и действий пользователя (нажатие на кнопку, выбор элемента и т.д.) на этих экранах. Поэтому пользовательские сценарии также необходимо привязать к экранам и элементам пользовательского интерфейса.

Как показано на рис. 9, в описании сценариев указываются элементы пользовательского интерфейса, что позволит в будущем проще переложить их на автоматизированное тестирование.

1. Account

Case 1.1 Авторизация по email/паролю

Начальные условия	устройство имеет высокоскоростное интернет-соединение, приложение запущено в первый раз или пользователь вышел из своего профиля. Отображается экран приветствия UI 1.2 EmailLogin
Ожидаемый результат	пользователю отображается экран UI 1.1 Profile с загруженным профилем

UI	**Действие пользователя**	**Реакция системы**
1.3	Ввел Email, Пароль и нажал “Войти” (LoginButton)	Если введены корректные email и пароль, то отобразится индикатор загрузки и осуществится автоматический переход на экран UI 1.1 Profile. В случае ошибок ввода данных пользователем должны отображаться сообщения об ошибках.
1.1	Ожидание	На экране должны отобразиться загруженные данные из профиля (состояние экрана Normal)

Рис. 9. Пример пользовательского сценария

Заключение

Описанная в статье методика позволяет провести техническое проектирование силами разработчиков и тестировщиков, получив необходимую для кодирования и тестирования информацию в удобном и наглядном формате. На рис. 10 показан финальный список документации, которая будет получена до начала этапа кодирования.

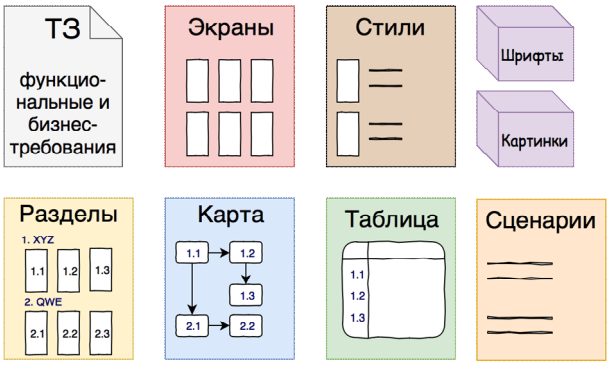


Рис. 10. Финальный список артефактов после технического проектирования

Каждый из документов требует относительно немного времени на создание и не требует дополнительный знаний и опыта. Данные документы могут быть созданы специалистами средней квалификации, а их использование упрощает и структурирует дальнейшую разработку.

Важно отметить, что необходимо обязательно контролировать, чтобы указанные в документах названия использовались всей командой при написании кода, тестовых скриптов и планировании работ.

Небольшой объем документации позволяет использовать ее в качестве чек-листов во время разработки и контроля качества продукта. А единые обозначения «документация-код» позволяют сократить время на обучение новых специалистов во время ротации и обновления команды проекта.

В качестве дальнейшего развития описанной методики предполагается реализация автоматизированной системы генерации кода на основе документации и, в обратную сторону, документации на основе программного кода. Также описанный формат документации может быть использован для автоматизированной проверки программного кода на соответствие первоначальной технической документации и выявления возможных отклонений.

Литература

1. Tavakkoli Alireza. Game Development and Simulation with Unreal Technology. Boca Raton: CRC Press. 2016. 427 p.

2. Shekar Siddharth. Cocos2d Cross-Platform Game Development Cookbook. Packt Publishing Ltd. 2014. 266 p.

3. Скит Джон. C# для профессионалов: тонкости программирования; пер. с англ. Ю.Н. Артеменко. Изд. 3-е. М.: Вильямс, 2014. 608 с.

4. Hocking Joseph. Unity in Action. Multiplatform game development in C# with Unity 5. Manning. 2015. 352 p.

5. Торн Алан. Искусство создания сценариев в unity; пер. с англ. Р.Н. Рагимова. М.: ДМК-Пресс, 2016. 360 с.

6. Интеграционные решения при построении корпоративных информационных систем / В.В. Сафронов и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4 (3). С. 646-654.

Поступила 25.06.2018; принята к публикации 10.09.2018

Информация об авторах

Черников Вячеслав Николаевич – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: slava.chernikoff@live.com

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: spodvalny@yandex.ru

Барабанов Владимир Федорович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvf@list.ru

Нужный Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nam14@mail.ru

DEVELOPING PROCESS FORMALIZATION OF A USER CROSS-PLATFORM MOBILE APPLICATION

V.N. Chernikov, S.L. Podvalny, V.F. Barabanov, A.M. Nuzhnyy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article describes the methodology for designing cross-platform mobile applications based on the user interface. The analysis of the software development procedure was performed and a list of the problems most frequently encountered by the development team and determined by the specifics of mobile business applications was determined. Based on the identified list of problems, the software development process was reviewed to identify the key steps that have the greatest impact on the speed and quality of coding and testing. An approach based on the visualization of a sequence of user transitions between application pages is described and the process of preliminary preparation of technical documentation that should be performed by the encoders and testers themselves is designed to unify the process of developing and using common terms and notations in technical documentation and program code. Methodical recommendations for creating a structure of cross-platform mobile applications based on the described technical documentation are given. The technique described in the article allows to carry out technical designing by the developers and testers, having received the information necessary for coding and testing in a convenient and visual format. The proposed approach allows to achieve a significant reduction in labor costs for the development and support of software products

Key words: cross-platform development, mobile applications, development methodology

References

1. Tavakkoli Alireza “Game Development and Simulation with Unreal Technology”, CRC Press, Boca Raton, 2016, 427 p.
2. Shakar S. “Cocos2d cross-platform game development cookbook”, Packt Publishing Ltd, 2014, 266 p.
3. Skeet J. “C# for professionals: the subtleties of programming”, trans. from English by Artemenko Yu.N., Moscow, Williams, 2014, 608 p.
4. Hocking J. “Unity in action. Multiplatform game development inC# with Unity 5”, Manning, 2015, 352 p.
5. Thorne A. “The Art of scripting in Unity”, trans. from English by Ragimov R.N., Moscow, DMK-Press, 360 p.
6. Safronov V.V. et al. “Integration solutions in the construction of corporate information systems”, *Proceedings of the Samara scientific center of RAS (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN)*, 2016, vol. 18, no. 4 (3), pp. 646-654.

Submitted 25.06.2018; revised 10.09.2018

Information about the authors

Vyacheslav N. Chernikov, Seeker, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: slava.chernikoff@live.com
Semyen L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru
Vladimir F. Barabanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvf@list.ru
Aleksandr M. Nuzhnyy, Cand. Sc. (Technical), Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nam14@mail.ru

УДК 65.011.56; 669-1

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ КООРДИНАЦИИ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСПИСАНИЯ

М.А. Цуканов, О.А. Божкова

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Старый Оскол, Россия

Аннотация: рассматривается вопрос актуальности задачи составления и корректировки производственного расписания на примере сталеплавильного производства. Проведена декомпозиция выполнения производственного плана и рассмотрены возможности применения различных видов корректировок на практике. Анализ составленных расписаний с учетом удовлетворения всех ограничений в текущей производственной ситуации в реалиях производственного процесса позволил определить различие в продолжительности межоперационных интервалов. Для выбора определенного расписания диспетчеру предлагается осуществить выбор по оптимальным критериям. Представленный адаптивный принцип, позволяющий осуществлять формирование и корректировку расписания на примере сталеплавильного производства с использованием фрактала Кантора, дает возможность учесть специфику производства и значительно повысить качество расписания. Разработанный алгоритм взаимодействия производственного оборудования с использованием элементов теории детерминированного хаоса при решении задачи составления расписания в результате проведенного исследования дополнен критериями оценки эффективности выполненного расписания. В качестве показателей производственной эффективности рассматриваются понижение расхода электроэнергии, повышение серийности, уменьшение удельных производственных потерь, уменьшение времени переналадки агрегатов и сокращение производственных затрат на разогрев стали. Проведен анализ эффекта при внедрении системы составления производственного расписания и выявлена экономия путем математических косвенных вычислений при использовании значения временных и энергетических ресурсов. Уменьшение времени корректировки расписания прямым образом способствует повышению производительности предприятий различных отраслей производства

Ключевые слова: оперативное управление, технологическая координация, производственное расписание, эффективность процессов

Введение

Для промышленных производств России является важным вопрос о значительном снижении удельных расходов энергии на 1 т продукции. Это достижимо при учете результатов оптимизации технологических режимов. Наглядно это позволяет заметить анализ металлургических предприятий. В рамках проведенного исследования были проанализированы АО «ОЭМК», ПАО «ММК», ОАО «НКМК» (Россия), ОАО «БМЗ» (Республика Беларусь). Апробация представлена на примере АО «ОЭМК». Технологическая схема комбината включает в себя подготовку исходных материалов к плавке, выплавку стали, внепечную обработку стали, непрерывную разливку, порезку на мерные заготовки, охлаждение, зачистку, контроль и осмотр.

В ходе производственного процесса выявлено, что непредвиденные производственные простои возникают с большой периодичностью и значительно повышают расход электроэнергии. К непредвиденным простоям, характеризуемым нами как недетерминированные события, т.е. события, останавливающие нормальный ход выполнения расписания, в частном случае поломки агрегатов, внеплановые заказы, нарушение технологии, вынужденные простои, превышающие время производственных ограничений, экстренные добавления заказов, отключение подачи электроэнергии, переназначение номенклатуры производимой продукции, изменение материально-технических ограничений, состава и параметров плановых простоев оборудования с учетом текущего состояния организационно-технологической системы, изменение периода поставки.

Актуальность задачи составления и корректировки производственного расписания

В таких условиях актуальной задачей является составление и корректировка производственного расписания, которую существенно

© Цуканов М.А., Божкова О.А., 2018

усложняет необходимость учета технологии выплавки стали на конкретном производстве.

В работах авторов [1,2,3,4,5,6,7] предлагаются различные алгоритмы формирования оперативно-производственных планов, которые при выполнении выдают множество расписаний для выбора диспетчером для дальнейшей реализации.

В статье [8] авторы рассмотрели вопросы оперативного управления производством, разработки корректирующих мероприятий при нарушении текущего плана относительно запланированного состояния и представили алгоритм формирования и корректировки расписания на основе фракталов Кантора. Данное математическое множество, обладающее свойством самоподобия, позволяет осуществлять корректировку расписания, предоставляя его в итоговом варианте не хуже, чем исходное.

Производственное расписание включает в себя список работ по выплавке сортаментов стали.

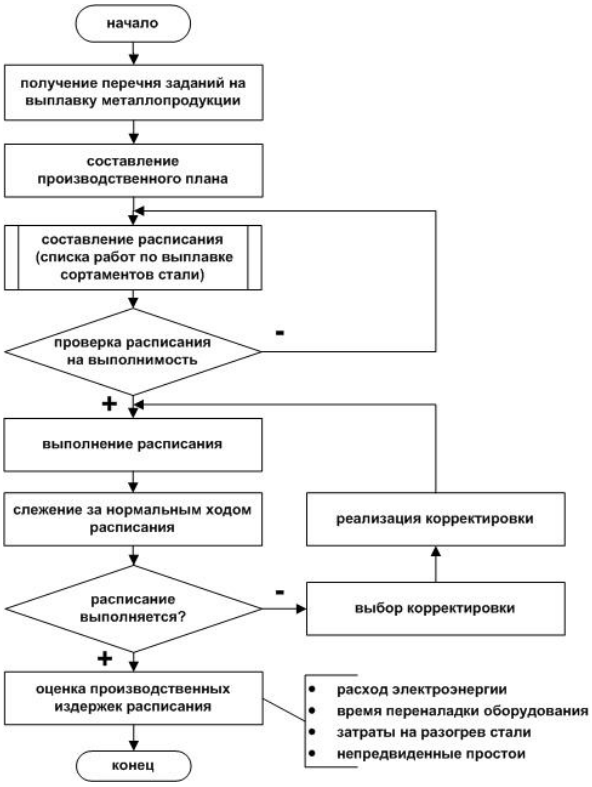


Рис. 1. Декомпозиция выполнения плана сталеплавильного производства

На расписание накладываются производственные ограничения, связанные с мощностями технологических агрегатов, технологическими маршрутами и имеющимися традициями сталеплавильного цеха. Они определяют, будет происходить выполнение расписания или нет. В случае, если расписание не выполняется, необходима корректировка данного расписания. В случае параметрической коррекции расписание перестраивается только по временным интервалам для некоторых производственных действий с участием агрегатов. Однако данный вид корректировки не всегда может подойти, тогда в расписание необходимо внести значительные структурные изменения и осуществить полную реорганизацию производственного плана в области проблемного участка. Такой вид корректировки расписания называют структурно-параметрическим. Далее наступает этап реализации выбранной корректировки.

Анализ составленных расписаний в реалиях производственного процесса

Для построения расписания на примере металлургического предприятия используется перечень заказов на металлопродукцию с детализацией по исполняемым технологическим агрегатам.

Агрегаты, находящиеся на ремонте, временно не учитываются в процессе составления расписания и освобождаются от выполнения сменно-суточного задания. Это определяется документом, например, планом предупредительных ремонтов и заносится в систему.

Рассматривая сложноструктурированную систему производства с родственными по задачам агрегатами, возможно выполнение производственных операций на одном из нескольких типовых агрегатов. В случае поломки одного вида агрегатов и возникновения недетерминированной ситуации в начале производственной цепочки заказы, выполняемые на агрегатах первой очереди, станут более приоритетными. Как только этот вид агрегатов будет готов к работе, заказы будут переназначены в соответствии со своими приоритетами.

Таким образом, для составления и выполнения расписания рассматриваются альтернативные пути с наличием нескольких вариантов выполнения сменно-суточного задания. При возникновении недетерминированного события запускается система, которая корректирует расписание, переназначая агрегаты, не нарушая технологического маршрута.

Технология предполагает проход по определенным агрегатам в исполняемом алгоритме. Для формирования расписания на производстве составляются серии заказов на металло-

продукцию S_pS_p, где p=(1, …,P) является номером серии, удовлетворяющим критерию оптимальности. В его качестве принята минимизация суммарных условных потерь, которые связаны с переналадкой всех единиц технологического оборудования при переходе с обработки одного заказа qq на другой q+1.

В качестве целевой функции такого расписания выступает минимизация приведенных потерь при смене технологии выплавки.

Под приведенными потерями следует понимать временные потери, связанные с переходом с одной технологии на другую, называемыми на производстве затраты на переналадку оборудования.

В результате выполнения алгоритма системой предлагается несколько вариантов расписаний с учетом удовлетворения всех ограничений в текущей производственной ситуации. Предлагаемые расписания отличаются по межоперационным интервалам, диспетчеру предлагается осуществить выбор по оптимальным критериям.

Принцип работы системы построения и корректировки производственного расписания

Система с реализацией алгоритма составления и корректировки расписания сложноструктурированного производства будет работать с начала суток в автоматическом режиме. При возникновении ситуации недетерминированного характера диспетчеру будет предложено выбрать новое расписание, которое составлено на основании полного перестроения расписания, либо частичной коррекции участка.

Для составления расписания в полуручном режиме диспетчеру необходимо много времени. Когда возникает событие, относящееся к недетерминированному, производственное расписание подвергается корректировке силами работников предприятия. Сначала определяется участок, на котором возникла проблема, затем перестраивается расписание и проверяется на ограничения. После загрузки нового расписания на сервер и изменения суточного рабочего плана персонала происходит переналадка оборудования. При внедрении всех внесенных изменений производственный процесс продолжается.

Автоматизированный вариант составления расписания требует от работников внести только входную информацию: сменно-суточное задание, последовательность технологических цепочек, длительность обработки стали на каждом технологическом агрегате, нормативные допустимые длительности простоев, графики ремонтов.

Было проведено исследование, которое основано на том, что этот подход может повысить оперативное управление. Основной эффект заключается в экономии времени.

Анализ эффекта при внедрении системы составления производственного расписания

В настоящее время при использовании стандартного механизма для составления и корректировки используются различные системы от узкоспециализированных до стандартных и адаптированных к решению данной задачи, например, MS Excel.

Авторами был проведен анализ по затратам времени до и после внедрения автоматизированной системы, в основе которой заложен алгоритм формирования и корректировки производственного расписания сталеплавильного цеха.

В настоящее время в обязанности мастера входят контроль производства, слежение за выполнением расписания и его корректировки с помощью стандартной офисной программы MS Excel. Процесс работы мастера смены возможно проследить на рис. 2.

Исправленный файл загружают на рабочий сервер и используют для работы. Если снова возникают недетермированные события, то необходимо обновить схему. Используемая офисная программа MS Excel предоставляет возможность для создания расписания в полуавтоматизированном виде. Инструмент позволяет учитывать все производственные ограничения, является доступным и простым в использовании.

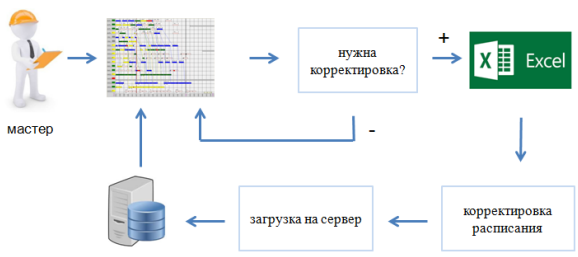


Рис. 2. Схема процесса формирования расписания производственного средствами MS Excel

Представленная схема составления и корректировки производственного расписания отличается недостатками. Используемый инструмент не обладает возможностями для объединения системы с фактическими показателями и не может охватить масштаб построения расписания более, чем на смену, в то время, когда планирование осуществляется на сутки. Изменению расписания предшествует процедура доступа к файлу, который располагается на сервере. Ответственный диспетчер должен после внесения корректировки каждый раз обновлять файл с расписанием на сервере.

Из этого следует, что перечисленные требования определяют важность вопроса о реализации алгоритма для корректировки и корректировки расписания. Кроме того, в производственном масштабе существует целый ряд ограничений, которые должны быть учтены при разработке и внедрении нового инструмента на предприятии.

Таким образом, вышеперечисленные требования обуславливают необходимость реализации алгоритма формирования и корректировки производственного расписания. Но для металлургического предприятия немаловажное значение имеют производственные ограничения, которые необходимо учитывать в процессе реализации инструмента построения и корректировки расписания.

Сравнение издержек производства в рамках существующей и предлагаемой программы возможно путем косвенных расчетов временных и энергетических ресурсов. Используемый вариант расписания в формате .xls требует много времени на подготовку по сравнению с предлагаемым автоматизированным вариантом. Для работы необходимо привлечь работников предприятия и обнаружить проблемную область, далее составить новое расписание, проверить его на все производственные ограничения и загрузить на сервер. Обо всех принятых изменениях должны быть оповещены все задействованные сотрудники, которые осуществляют переналадку оборудования для продолжения производственного процесса по подготовке металлопродукции.

При переводе данной схемы в абсолютные величины можно определить количество времени, необходимое для её выполнения:

$$t_{общ.тек.}=t_1+ t_2+ t_3+ t_4+ t_5+ t_6, \quad (1)$$

где $t_{общ.тек.}$– общее время при применении текущего инструмента составления и корректирования расписания, t_1– время реагирования работников на необходимость внесения корректировок, t_2– время определения проблемного участка и осуществления корректировки, t_3 – время проверки расписания на производственные ограничения, t_4– время загрузки скорректированного расписания на сервер, t_5 – время оповещения занятых работников об изменениях, t_6 – время осуществления переналадки оборудования.

При внедрении автоматизированной системы в момент появления недетерминированного события в ходе выполнения расписания будет показана проблемная область и предложено несколько вариантов корректировок, которые не пересекаются с текущим технологическим процессом и удовлетворяют всем производственным ограничениям, выбранный вариант автоматически будет применен, что избавляет сменного мастера от загрузки этого расписания на сервер. При необходимости корректировки система выдаст сообщение, поэтому $t_1'=0$, t_2' сократится до 3-5 минут, а необходимое время t_3' – не более 1 минуты, кроме того, предлагаемая система будет в автоматическом режиме сохранять скорректированный вариант производственного расписания, а значит, $t_4'=0$. Однако $t_5'=t_5$ и $t_6'=t_6$, потому что данные величины не затрагиваются алгоритмом и не влияют на организацию работы сотрудников металлургического предприятия.

В данном случае экономия времени при внедрении разработанного алгоритма будет рассчитана по формуле 2:

$$t_{общ.пр.}=t_1'+ t_2'+ t_3'+ t_4'+ t_5'+ t_6'= = t_2'+ t_3' +t_5+ t_6. \quad (2)$$

Разница между временными затратами при применении текущего инструмента и предлагаемого составит

$$\Delta t = t_{общ.тек.} – t_{общ.пр.} = t_1 + \Delta t_2+ \Delta t_3+ t_4, \quad (3)$$

где Δt – разница временных затрат при внедрении нового алгоритма относительно существующего, t_n' – временные затраты, идентичные затратам формулы 1.

Используя производственные значения времени $t_1 = 10$ мин., $t_2 = 40$ мин., $t_3 = 10$ мин., $t_4 = 5$ мин., $t_2'= 5$ мин., $t_3'= 1$ мин., получаем $\Delta t = 59$ мин.

На рис. 3 проиллюстрированы затраты времени при использовании текущего инструмента и время, требуемое на выполнение расписания с использованием новой системы.

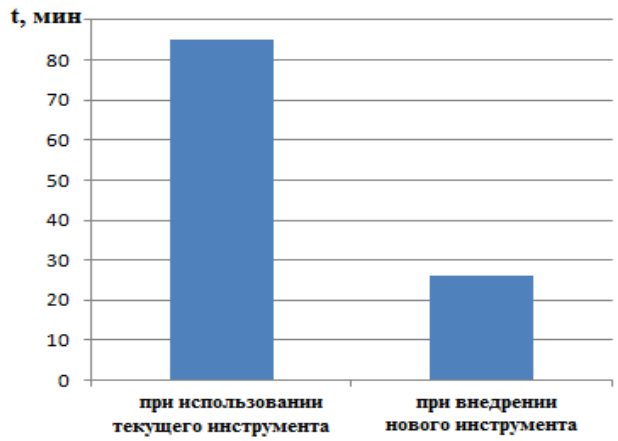


Рис. 3. Сравнение временных затрат на выполнение расписаний производственной цепочки

Следовательно, исходя из математических вычислений при подстановке производственных результатов при возникновении недетерминированного события, Δt может составлять около 60 минут, которые при внедрении системы могут быть использованы при выполнении производственного задания в обозначенное планом время.

Оценить эффективность работы сталеплавильного цеха возможно по показателям повышение серийности, сокращению удельных производственных потерь и времени переналадки агрегатов, снижению потребления энергии и сокращения затрат на разогрев стали.

Заключение

Существует прямая связь между длительностью простоев и энергопотреблением. Снижение временных затрат на корректировку расписания позволит повысить производительность и энергоэффективность цеха в случае недетерминированных событий.

Экономия средств зависит от многих факторов, не только от времени составления расписания, от технологии, от стоимости данной продукции. Если удается снизить затраты на производстве хотя бы на 1%, то это имеет существенный экономический эффект, поскольку цена на электроэнергию для такого цеха с его энергопотреблением очень высокая.

Литература

1. Антамошкина О.И., Кравцов П.А. Алгоритм формирования производственных расписаний в условиях риска и неопределенности // Сибирский журнал науки и технологий. 2008. № 5. С. 91-94.

2. Безгинов А.Н., Трегубов С.Ю. Многокритериальный подход к оценке расписания занятий на основе нечеткой логики // Проблемы управления. 2011. № 2. С. 52 - 59.

3. Громов С.А. Разработка модели, методов и программного обеспечения для оперативного планирования производства на основе теории адаптации и технологии программных агентов: дис. …канд. техн. наук: 05.02.22, 05.13.17. М., 2011

4. Куликов М.С. Модели и методы распределительного типа при планировании и оперативном управлении производственными системами: дис. …канд. техн. наук: 05.13.01. Нижний Новгород, 2014.

5. Родькина М.Б. Разработка эволюционных алгоритмов для решения задач теории расписаний в условиях неопределенности: дис. …канд. техн. наук: 05.13.17. Воронеж, 2013.

6. Саратов А.А. Конкурентный метод синтеза производственных расписаний // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 104-110.

7. Скакалина Е.В. Эффективное построение множества расписаний с минимальным суммарным временем завершения работ // Радиоэлектроника и информатика. 2001. № 3. С. 43-46.

8. Цуканов М.А., Божкова О.А. Разработка и реализация алгоритма построения расписания сталеплавильного производства на основе адаптации фрактала Кантора // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 32-36.

Поступила 15.06.2018; принята к публикации 07.09.2018

Информация об авторах

Цуканов Михаил Александрович – канд. техн. наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42), e-mail: tsukanov_m_a@mail.ru

Божкова Олеся Александровна – магистр, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (309516, Белгородская обл., г. Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42), e-mail: lesyabozhkova@yandex.ru

IMPROVING THE EFFICIENCY OF OPERATIONAL MANAGEMENT AND TECHNOLOGICAL PROCESSES OF COORDINATION BASED ON THE ASSESSMENT OF THE PRODUCTION SCHEDULE

M.A. Tsukanov, O.A. Bozhkova

Ugarov Stary Oskol Technological Institute National University of Science and Technology "MISiS", Stary Oskol, Russia

Abstract: the question of the relevance of the task of construction and adjusting the production schedule on the example of steelmaking enterprise is considered. A decomposition of the production plan was carried out and the possibilities of applying various types of adjustments in practice were considered. The analysis of the compiled schedules, taking into account the satisfaction of all restrictions in the current production situation in the realities of the production process, made it possible to determine the difference in the duration of the inter-operation intervals. To select a specific schedule, the dispatcher is offered to make a selection according to optimal criteria. The presented adaptive principle, which allows the formation and adjustment of the schedule on the example of steelmaking using the Cantor fractal, allows one to take into account the specifics of production and significantly improve the quality of the schedule. The developed algorithm for the interaction of production equipment with the use of elements of the theory of deterministic chaos in solving the problem of scheduling is supplemented by criteria for evaluating the effectiveness of the completed schedule. Lowering power consumption, increasing serial production, reducing specific production losses, reducing the changeover time of the units and reducing production costs for heating steel are considered as indicators of production efficiency. The analysis of the effect during the implementation of the production scheduling system was carried out and the economy was revealed by means of mathematical indirect calculations when using the value of time and energy resources. Reducing the time to adjust the schedule directly contributes to improving the performance of enterprises in various industries

Key words: operational management, technological coordination, production schedule, efficiency of processes

References

1. Antamoshkina O.I., Kravtsov P.A. “Algorithm for generating production schedules in the conditions of risk and uncertainty”, *Siberian Journal of Science and Technology (Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy)*, Siberian State Aerospace University, 2008, no. 5, pp. 91-94.

2. Bezginov A.N., Tregubov S.Yu. “Multicriterion approach to assessment schedules based on fuzzy logic”, *Management problems (Problemy upravleniya)*, 2011, no. 2, pp. 52-59.

3. Gromov S.A. “Development models, methods, and software for efficient production planning based on the theory of adaptation and technology software agents: Cand. Tech. Sci. diss.” (“Razrabotka modeli, metodov i programmnogo obespecheniya dlya operativnogo planirovaniya proizvodstva na osnove teorii adaptatsii i tekhnologii programmnykh agentov: dis. kand. tekhn. nauk”), Moscow, 2011.

4. Kulikov M.S. “Models and methods of distribution of the planning type and operational management of production systems: Cand. Tech. Sci. diss.” (“Modeli i metody raspredelitel'nogo tipa pri planirovanii i operativnom upravlenii proizvodstvennymi sistemami: dis. kand. tekhn. nauk”), Nizhniy Novgorod, 2014.

5. Rodkina M.B. “Development of evolutionary algorithms for solving tasks of scheduling theory under uncertainty: Cand. Tech. Sci. diss.” (“Razrabotka evolyutsionnykh algoritmov dlya resheniya zadach teorii raspisaniy v usloviyakh neopredelennosti: dis. kand. tekhn. nauk”), Voronezh, 2013.

6. Saratov A.A. “Competitive method of production schedules synthesis”, *Proceedings of the Tula State University. Technical science (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki)*, 2014, no. 3, pp. 104-110.

7. Skakalina E.V. “Efficient construction of multiple schedules with a minimum total time for completion of work”, *Electronics and informatics (Radioelektronika i informatika)*, 2001, no. 3, pp. 43-46.

8. Tsukanov M.A., Bozhkova O.A. “Development and implementation of the algorithm for constructing the schedule of steelmaking production based on the adaptation of the Kantor fractal”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta),* 2017, vol. 13, no. 6, pp. 32-36.

Submitted 15.06.2018; revised 07.09.2018

Information about the authors

Mikhail A. Tsukanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Ugarov Stary Oskol Technological Institute National University of Science and Technology "MISiS" (42 Makarenko Str., Stary Oskol 309516, Russia), e-mail: tsukanov_m_a@mail.ru
Olesya A. Bozhkova – MA, Ugarov Stary Oskol Technological Institute National University of Science and Technology "MISiS" (42 Makarenko Str., Stary Oskol, 309516, Russia), e-mail: lesyabozhkova@yandex.ru

УДК 004.4

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОИСКА ПУТИ ДЛЯ МНОЖЕСТВА ОБЪЕКТОВ С ОБЛАСТЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ПРОХОДИМОСТИ

В.Ф. Барабанов, Н.И. Гребенникова, А.К. Донских, С.А. Коваленко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: дано описание решения задачи поиска кратчайшего пути для множества объектов с учетом препятствий и труднопроходимых областей. Сформированы функциональные требования к предложенному модулю поиска пути. Приведен обзор алгоритмов оптимизации пути, для выбранного алгоритма разработана модульная структурная схема приложения. Данное приложение предоставляет возможности по отслеживанию состояний объектов, что позволяет производить корректировку результатов поиска пути. Для корректной работы модуля поиска пути была разработана собственная структура данных. Для работы с множеством объектов предложен специальный метод, который находит самый близкий к цели объект, затем с помощью основного алгоритма оптимизации пути строит для него путь. Для удобства использования рассматриваемого программного решения вычисление маршрута было предложено перенести в параллельный поток. Выработаны рекомендации для выбора параметров работы программного модуля, алгоритма оптимизации для получения точных результатов. Приведенные рекомендации позволяют наиболее полно воспользоваться возможностями программного модуля для поиска кратчайшего пути между объектами, разделенными труднопроходимыми областями

Ключевые слова: алгоритмы оптимизации, поиск кратчайшего пути, программная реализация

Введение

Поиск оптимального маршрута между двумя точками (поиск пути, англ. Pathfinding) применяется во многих областях разработки компьютерных программ, например, в разработке программ навигации, трассировки печатных плат, моделировании и в видеоиграх.

Однако часто требуется выполнять поиск оптимального пути для различных объектов, учитывая различные по форме, перемещающиеся препятствия и труднопроходимые для агентов области.

В данной работе решается задача поиска пути для множества объектов. После анализа существующих программных продуктов было принято решение разработать собственный модуль на игровом движке Unity3D.

Функциональные требования к разрабатываемому модулю поиска пути

Алгоритм поиска пути должен учитывать следующие объекты: агент; статическое препятствие; динамическое препятствие; область, с различным коэффициентом проходимости. Разработанный программный модуль должен иметь возможность выполнять поиск объектов, относящихся к поиску пути, в определенной области, добавлять к уже имеющимся объектам новые, удалять объекты в определенной области, быть не требовательным к ресурсам и прост в конфигурации, а также выполнять очистку всех объектов. Программное средство должно обладать возможностями по отслеживанию за изменением состояний объектов, благодаря которому будет производиться корректировка результатов поиска пути.

Алгоритмы оптимизации пути можно условно разделить на две различные категории. Первая категория, это категория алгоритмов, в которых все препятствия заранее неизвестны и об их существовании следует узнавать на каждом шаге работы алгоритма. Данная категория оптимальна для динамически изменяющихся сред. Вторая категория предназначена для алгоритмов, в которых среда использования относительно статична. Но этой категории алгоритмов требуется заранее, перед использованием алгоритма, просканировать требуемую среду.

Сущность большинства методов заключается в поиске пути на графе, начиная с одной (стартовой) точки и исследуя смежные узлы до тех пор, пока не будет достигнут узел назначения (конечный узел).

К самым известным и популярным алгоритмам поиска пути относятся такие алгоритмы: алгоритм поиска A*; алгоритм Дейкстры;

© Барабанов В.Ф., Гребенникова Н.И., Донских А.К., Коваленко С.А., 2018

волновой алгоритм; навигационная сетка; метод потенциальных полей.

Поиск A* (произносится «А звезда» или «А стар», от англ. A star) – алгоритм поиска по первому наилучшему совпадению на графе, который находит маршрут с наименьшей стоимостью от одной вершины (начальной) к другой (целевой, конечной). Порядок обхода вершин определяется эвристической функцией «расстояние + стоимость» (обычно обозначаемой как f(x)). Эта функция - сумма двух других: функции стоимости достижения рассматриваемой вершины (x) из начальной (обычно обозначается как g(x) и может быть как эвристической, так и нет), и функции эвристической оценки расстояния от рассматриваемой вершины к конечной (обозначается как h(x)).

A* пошагово просматривает все пути, ведущие от начальной вершины в конечную, пока не найдёт минимальный. В начале работы просматриваются узлы, смежные с начальным; выбирается тот из них, который имеет минимальное значение f(x), после чего этот узел раскрывается. На каждом этапе алгоритм оперирует с множеством путей из начальной точки до всех ещё не раскрытых (листовых) вершин графа - множеством частных решений, - которое размещается в очереди с приоритетом. Приоритет пути определяется по значению f(x) = g(x) + h(x). Алгоритм продолжает свою работу до тех пор, пока значение f(x) целевой вершины не окажется меньшим, чем любое значение в очереди, либо пока всё дерево не будет просмотрено. Из множества решений выбирается решение с наименьшей стоимостью. Чем меньше эвристика h(x), тем больше приоритет, поэтому для реализации очереди можно использовать сортирующие деревья.

Схема алгоритма представлена на рис. 1.

Реализация программного комплекса поиска пути

В роли основного алгоритма был выбран алгоритм A*, т.к. он является наиболее быстрым алгоритмом при сравнительно легкой реализации.

Для оптимизации работы поиска пути было решено ввести подмодуль для сканирования локации. И хотя этот модуль и является вспомогательным, от этого он не становится менее важным, так как от его работы зависит и работа модуля поиска пути, и удобство использования программного решения.

Структурная схема модулей проектируемого приложения представлена на рис. 2.

Модуль-карта проходит все точки в заданной области с указанным шагом и генерирует на основе этих точек определенную структуру данных.

Данная структура разработана специально для выбранного алгоритма. Так как A* для своей работы должен знать о соседях, то в структуру включено поле со списком соседей, также было добавлено поле, хранящее уровень проходимости ячейки (например, препятствие, труднопроходимая ячейка и свободная область). Помимо этого, структура должна содержать и свою позицию.

Во время сканирования новой ячейки алгоритм проверяет каждую из соседних ячеек текущей ячейки, и если соседняя ячейка уже была просканирована, то добавляет ее в список соседей. Также алгоритм устанавливает тип ячейки, если просканированный объект имеет свойство “static” установленное в значение истина, то тип ячейки является препятствием, но, если объект имеет компонент “MapObject”, то он установит для ячейки тип, указанный в этом компоненте, несмотря на свойство “static”. Если просканированная область не имеет объектов или в ней отсутствуют объекты с компонентами “MapObject”, то она сохраняется как свободная.

Схема работы алгоритма сканирования представлена на рис. 3.

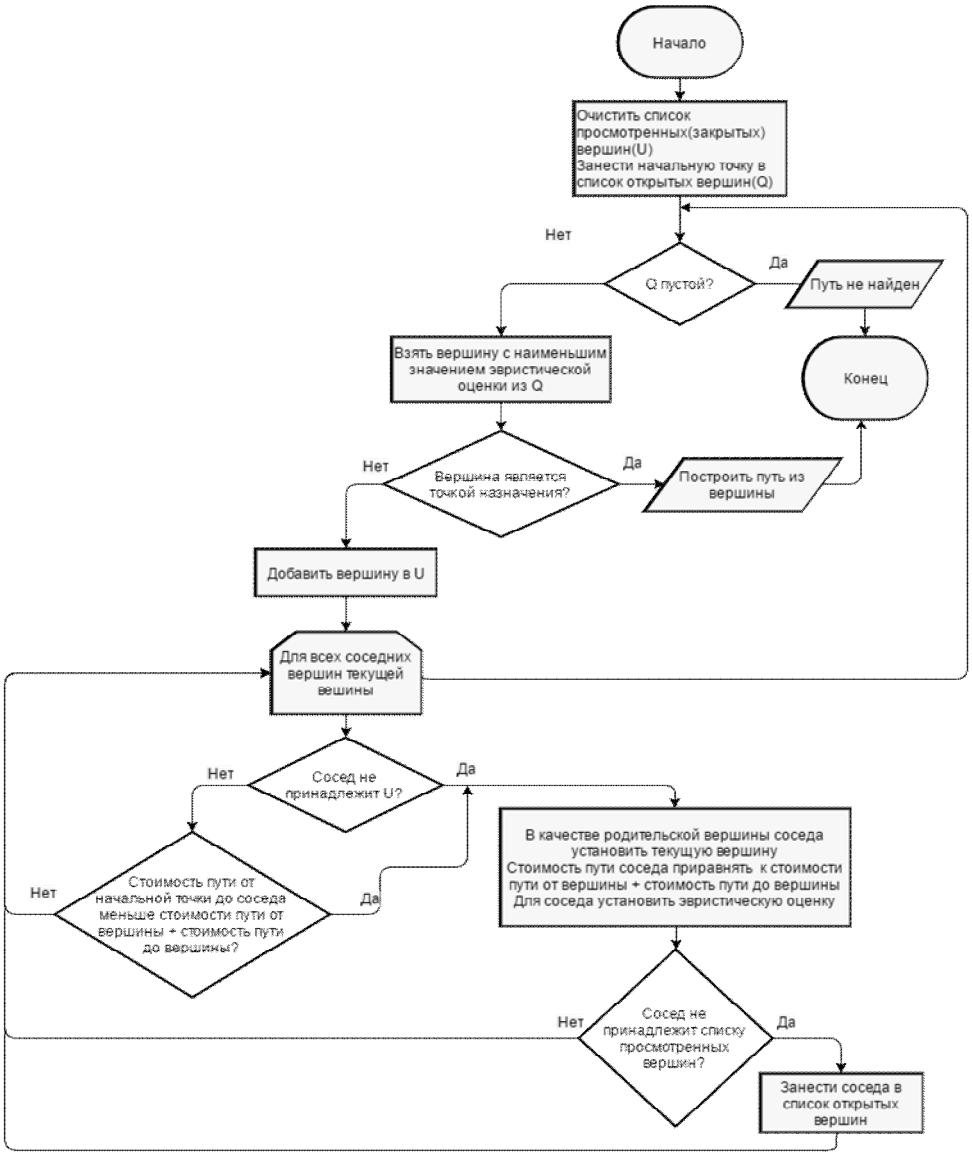


Рис. 1. Схема алгоритма A*

Рис. 2. Структурная схема модулей

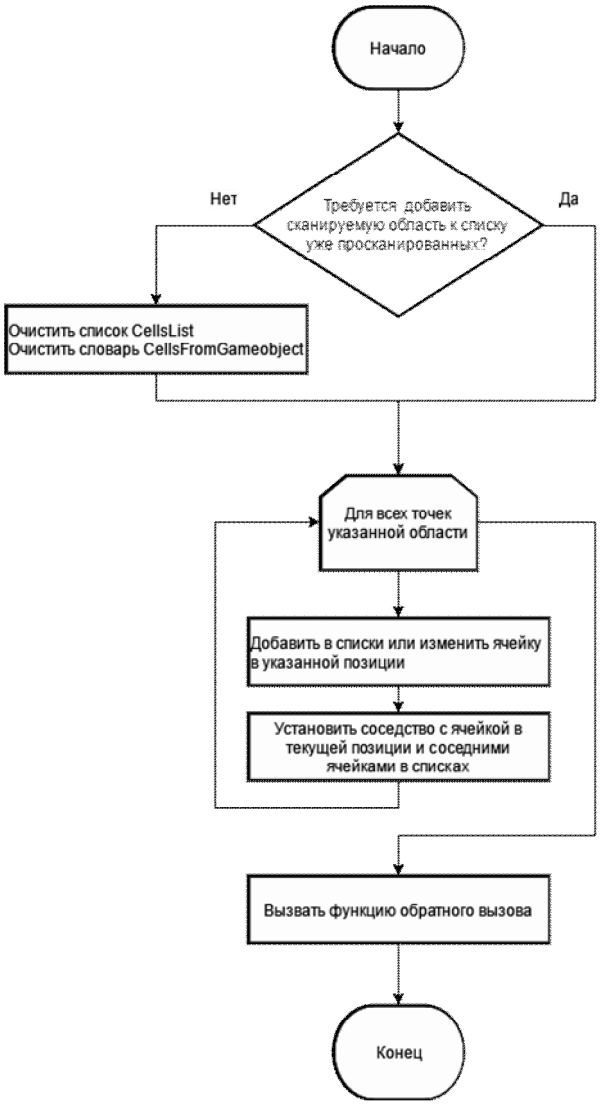


Рис. 3. Схема работы алгоритма сканирования

Схематичное изображение алгоритма работы установления соседства отображено на рис. 4.

Для оптимизации процесса поиска ячейки в списке уже просканированных ячеек список должен быть одной из реализаций сортирующего списка или дерева поиска. В данной реализации алгоритма был выбран список, сортирующий по хеш-коду, который генерируется из позиции, т.к. на одну позицию приходится одна ячейка. Также благодаря тому, что все просканированные ячейки хранятся в списке, достаточно просто сделать так, чтобы какую-либо область можно было сканировать поэтапно, с добавлением к уже просканированным областям с сохранением и добавлением всех списков соседей.

Разработанный программный модуль выполняет слежение за всеми объектами. Для этого компонент «MapObject», имеющийся у каждого препятствия, при изменении координат или типа объекта генерирует событие, которое прослушивает основной модуль сканирования.

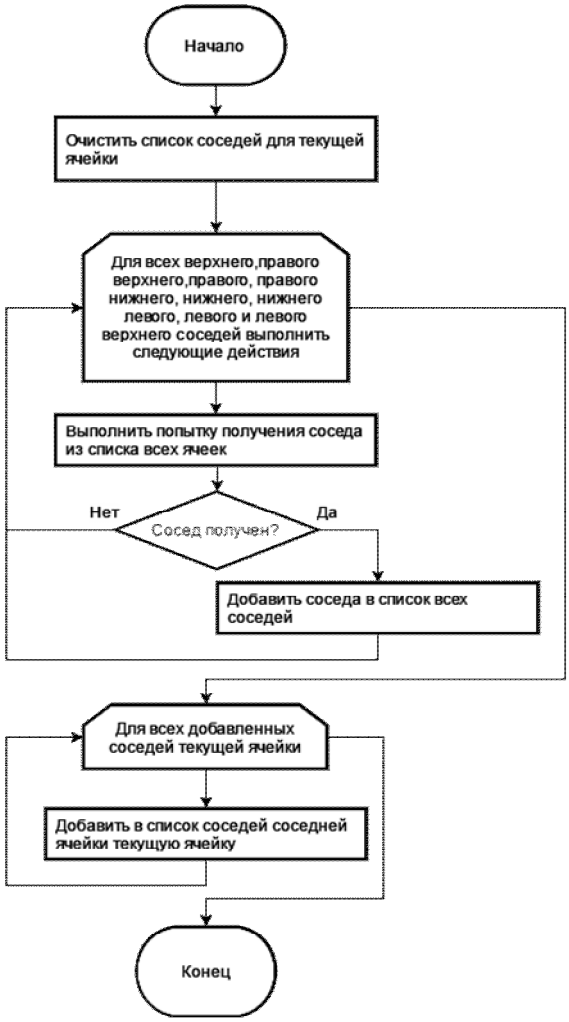


Рис. 4. Схема работы алгоритма установки соседства

При изменении типа объекта модуль выполняет изменение всех областей, принадлежащих данному объекту на новый тип. При изменении координат модуль переносит ячейки, принадлежащие вызвавшему изменение объекту в новые координаты, и если новые координаты ячеек, принадлежащих объекту, есть в списке просканированных ячеек, то происходит только изменение типа этих ячеек на тип объекта и изменение владельца этих ячеек на объект, вызвавший изменение. Если новые координаты не содержатся в списке просканированных ячеек, то выполняется их добавление к этому списку с добавлением всех соседей.

Схема алгоритма метода изменения расстояния продемонстрирована на рис. 5.

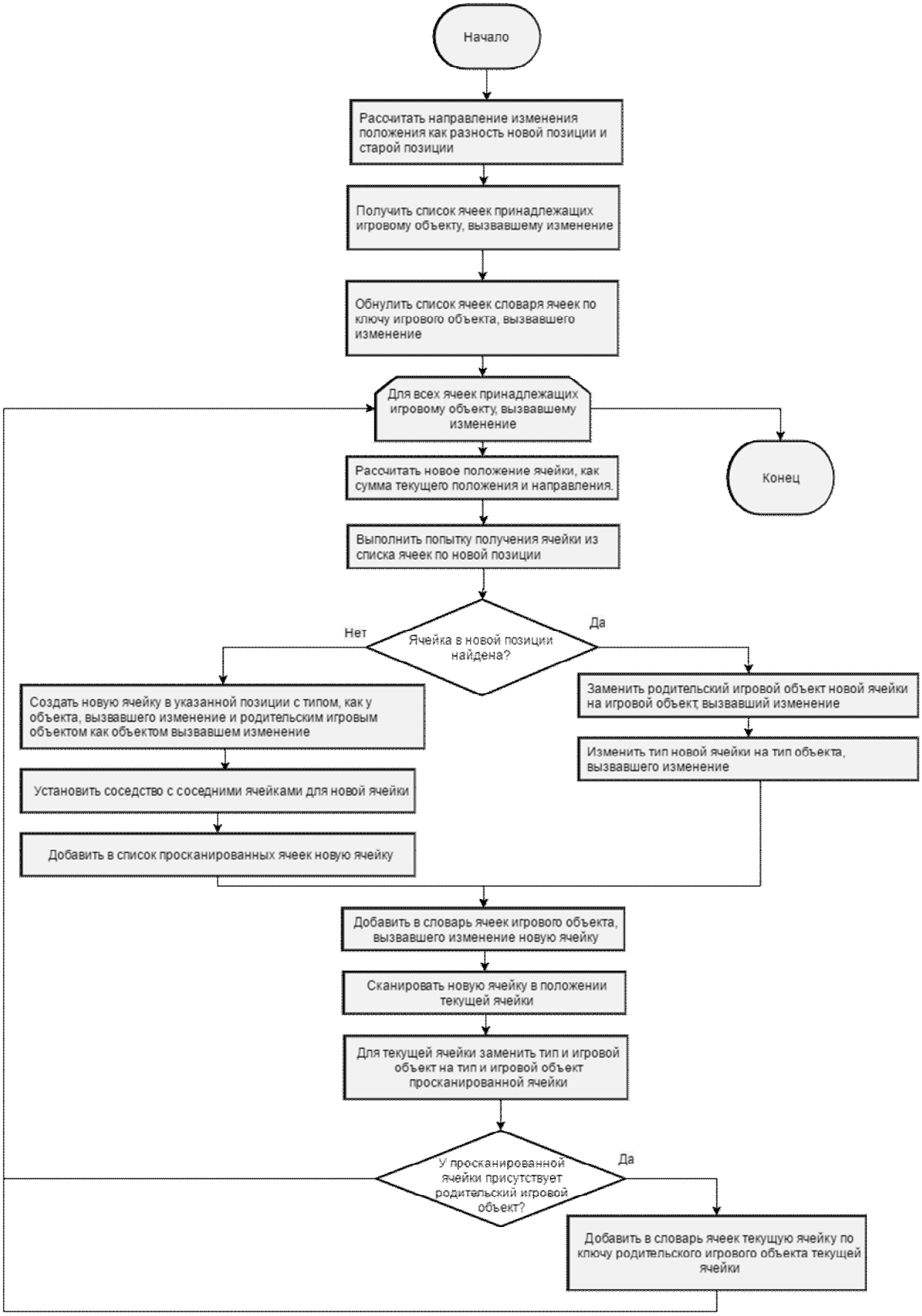


Рис. 5. Схема работы алгоритма изменения положения игрового объекта

Модуль поиска пути является центральным модулем разработанного программного решения. Поэтому было принято решение поместить его в параллельный поток, а для сообщения результата выполнения использовать функцию обратного вызова.

Для корректной работы модуля поиска пути была разработана собственная структура данных, которую будем называть вершиной. Вершина содержит в себе представленную ранее структуру данных для указания текущей ячейки, родительскую вершину для корректной работы алгоритма, а также стоимость достижения рассматриваемой вершины от изначальной и функции эвристической оценки расстояния от рассматриваемой вершины к конечной.

Данная структура представлена на рис. 6.

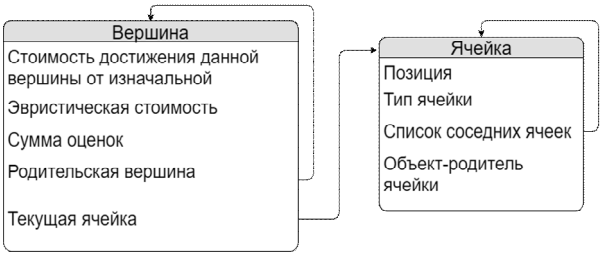


Рис. 6. Структура данных вершины

Также для оптимизации работы алгоритма тип закрытого и открытого списков должен быть сортирующим. По аналогии со сканирующим модулем был выбран сортирующий по хеш-коду список. Кроме того, для оптимизации получения вершины из открытого списка с наименьшим значением эвристической оценки было принято решение ввести еще один список, но на этот раз сортирующий по эвристической оценке. Алгоритм работы оптимизации пути представлен на рис. 7.

Так как алгоритм требует получения значения из списка по двум разным критериям (поиск соседней ячейки в списке просмотренных вершин и получение вершины с наименьшей эвристической оценкой), то было введено два списка для разных критериев. Результат работы модуля поиска пути отображен на рис. 8. Черный цвет – непроходимая область; светло-серый цвет – труднопроходимая область. Светло-серой линией обозначен проложенный путь.

Как можно видеть, алгоритм старается избегать светло-серых нежелательных областей, но если обход подобной области является слишком накладным, то алгоритм проходит эту область так, чтобы присутствие в нежелательном объекте оказалось минимальным.

Для работы с множеством игровых объектов разработан специальный метод, одним из входных параметров которого является массив игровых объектов. Данный метод сначала находит самый близкий к цели объект, затем с помощью основного алгоритма оптимизации пути строит для него путь. Также этот метод строит путь до выбранного ближайшего игрового объекта от всех остальных объектов, а затем объединяет оба пути и вызывает функцию обратного вызова данного объекта.

Заключение

Для удобства использования разработанного программного решения вычисление маршрута было перенесено в параллельный поток, так как при достаточно большом размере области поиска маршрута алгоритм будет отрабатывать существенное время, а результат возвращаться с помощью функции обратного вызова.

Рекомендуется при первом вызове расчета маршрута передавать значение погрешности большее 1, так как при высоком значении погрешности алгоритм отрабатывает значительно быстрее, но при этом выдает приблизительный результат. И для того, чтобы объект, для которого требуется построить маршрут, не ожидал полного расчета, а сразу начал движение, требуется вызывать расчет с высокой погрешностью, а затем уже второй раз для более точного результата.

Рекомендуется сканировать карту местности либо при загрузке сцены, либо небольшими частями.

В качестве рекомендаций можно использовать выбор алгоритма оптимизации, основанный на статистике использования программного модуля, например, если точка назначения меняется редко, то предпочтительнее использовать волновой алгоритм, иначе использовать A*. Также если карта не сильно загружена препятствиями, то перспективно использовать метод потенциальных полей.

Еще одной точкой расширения является возможность кэширования уже найденных маршрутов. Если точка, из которой следует выполнять поиск, и точка, к которой следует выполнять поиск пути, находятся близко к какой-либо из точек уже рассчитанного маршрута, то следует использовать части этого маршрута для оптимизации работы алгоритма и исключения данных точек рассчитанного маршрута из алгоритма.

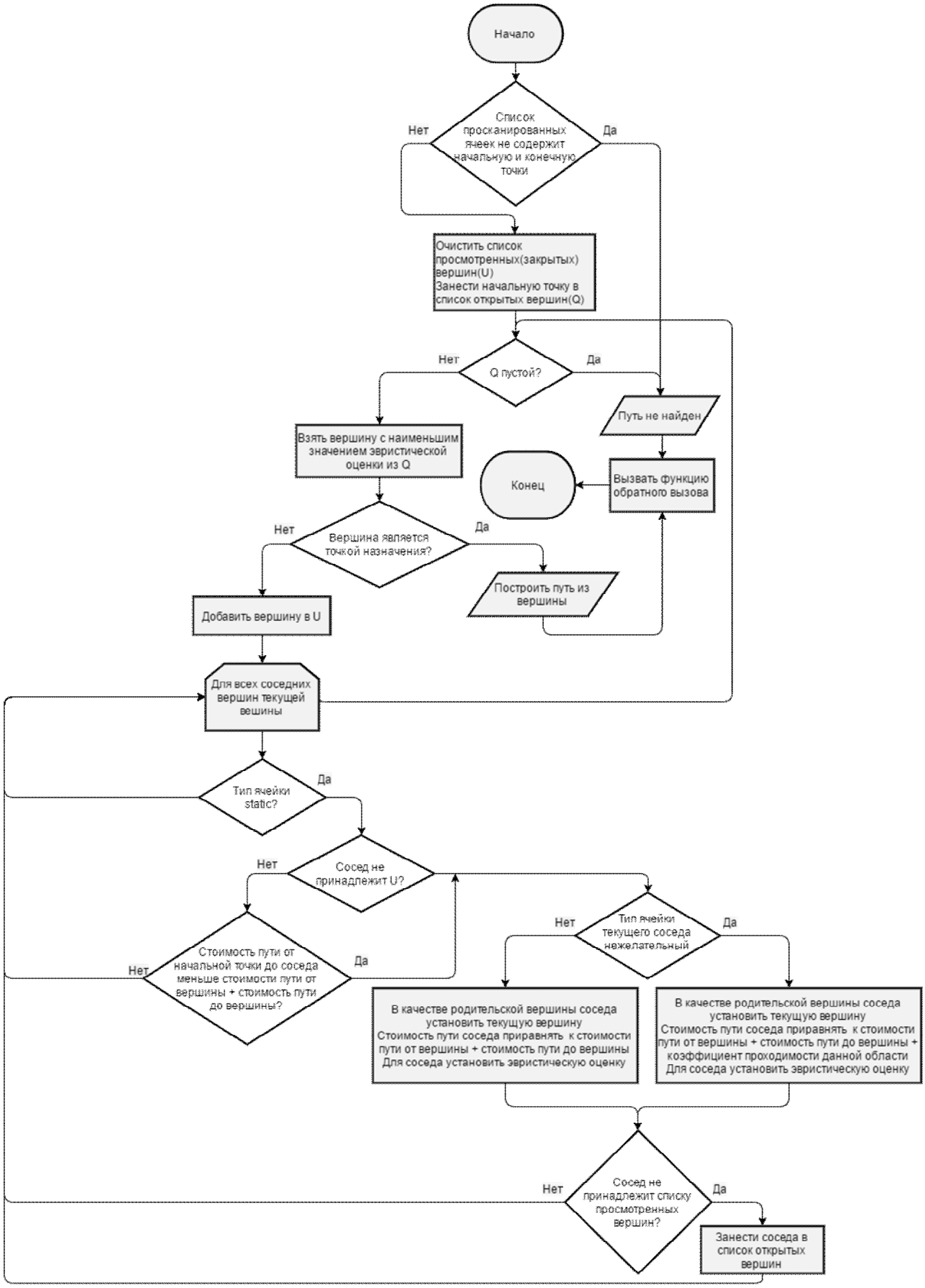


Рис. 7. Схема алгоритма оптимизации пути

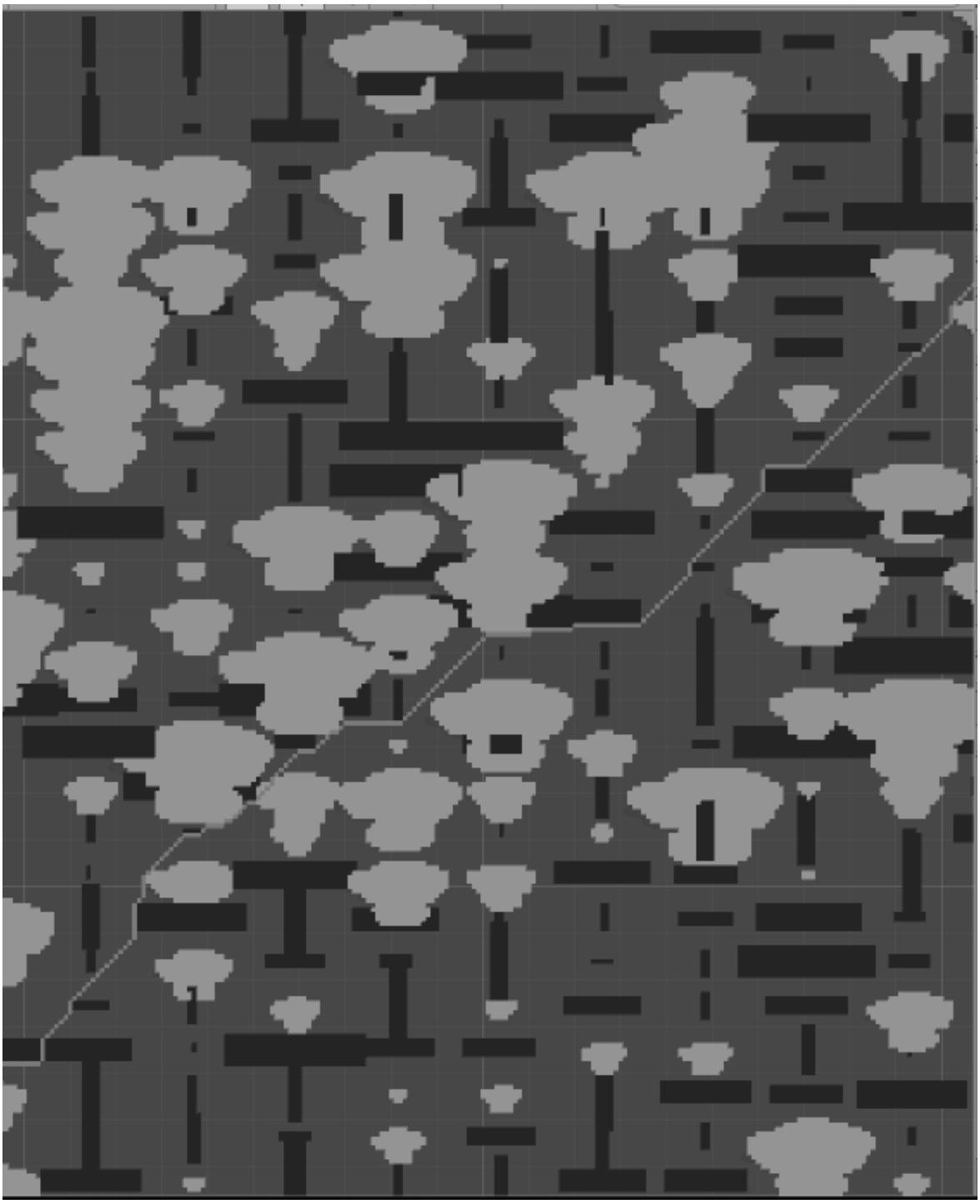


Рис. 8. Результат работы модуля поиска пути

Разработанный модуль может использоваться для различных типов программного обеспечения, позволяет его интегрировать в уже разработанные или только разрабатываемые программные средства.

Литература

1. Tavakkoli Alireza Game Development and Simulation with Unreal Technology. Boca Raton: CRC Press. 2016. 427 p.

2. Shekar S. Cocos2d Cross-Platform Game Development Cookbook. Packt Publishing Ltd. 2014. 266 p.

3. Скит Джон. C# для профессионалов: тонкости программирования; пер. с англ. Ю. Н. Артеменко. Изд. 3-е. М.: Вильямс, 2014. 608 с.

4. Hocking Joseph. Unity in Action. Multiplatform game development in C# with Unity 5. Manning, 2015. 352 p.

5. Торн Алан Искусство создания сценариев в Unity; пер. с англ. Р. Н. Рагимова. М.: ДМК-Пресс. 360 с.

6. Плотников О.А., Подвальный Е.С. Разработка меметического алгоритма для решения задач

оптимального планирования грузоперевозок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 10.1. С. 19-24.

7. Плотников О.А., Подвальный Е.С. Разработка алгоритма для комплексного решения задач транспортной логистики // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 11. С. 102-105.

Поступила 01.06.2018; принята к публикации 14.09.2018

Информация об авторах

Барабанов Владимир Федорович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvf@list.ru
Гребенникова Наталия Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: g-naty@yandex.ru
Донских Андрей Константинович – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: dronpankne@mail.ru
Коваленко Сергей Александрович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sergpc@yandex.ru

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF PATHFINDING FOR MULTIPLE OBJECTS WITH AREAS OF DIFFERENT PERMEABILITY

V.F. Barabanov, N.I. Grebennikova, A.K. Donskikh, S.A. Kovalenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a description is given of the solution of the shortest-path search problem for a set of objects with obstacles and difficult-to-reach areas. The functional requirements for the pathfinder module being developed are formed. An overview of the path optimization algorithms is given, and a modular application structural diagram was developed for the selected algorithm. The developed application provides the ability to track the states of objects, which allows one to adjust the results of the search path. For the correct operation of the path finding module, its own data structure was developed. To work with a variety of objects, a special method was proposed that finds the object closest to the target, then builds a path for it using the basic optimization algorithm. For ease of use of the developed software solution, the calculation of the route was proposed to be transferred to a parallel stream. Recommendations were given for the selection of the operating parameters of the software module and the optimization algorithm for obtaining accurate results. These recommendations allow one to make the most of the program module's capabilities to find the shortest path between objects separated by difficult areas

Key words: optimization algorithms, search for the shortest path, software implementation

References

1. Tavakkoli Alireza "Game Development and Simulation with Unreal Technology", CRC Press, Boca Raton, 2016, 427 p.
2. Shakar S. "Cocos2d cross-platform game development cookbook", Packt Publishing Ltd, 2014, 266 p.
3. Skeet J. "C# for professionals: the subtleties of programming", trans. from English by Artemenko Yu.N., Moscow, Williams, 2014, 608 p.
4. Hocking J. "Unity in action. Multiplatform game development inC# with Unity 5", Manning, 2015, 352 p.
5. Thorne A. "The Art of scripting in Unity", trans. from English by Ragimov R.N., Moscow, DMK-Press, 360 p.
6. Plotnikov O.A., Podvalnyy E.S. "Development of genetic algorithm for solving problems of optimal planning of cargo transportation", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 10-1, pp. 19-24.
7. Plotnikov O.A., Podvalnyy E.S. "Development of algorithm for complex solution of transport logistics problems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 11, pp. 102-105.

Submitted 01.06.2018; revised 14.09.2018

Information about the authors

Vladimir F. Barabanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail:bvf@list.ru
Natalia I. Grebennikova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail:g-naty@yandex.ru
Sergey A. Kovalenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sergpc@yandex.ru
Andrey K. Donskikh, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: dronpankne@mail.ru

УДК 004.94

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ API-ИНТЕРФЕЙСА PLANT SIMULATION ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ

П.Ю. Гусев, Ю.С. Скрипченко, А.А. Пак, К.Ю. Гусев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается вопрос оптимизации транспортной системы производственного подразделения с использованием программного комплекса имитационного моделирования Plant Simulation. В качестве исследуемой системы выступает участок механической обработки. На исследуемом участке механической обработки располагаются обрабатывающие центры DMU. Сложность моделирования исследуемого участка заключается в обработке деталей из нескольких видов материалов, а также в наличии нескольких типоразмеров. Транспортная система участка механической обработки представлена транспортной тележкой. На участке имеется одна транспортная тележка, которая доставляет заготовки для обработки, а также отвозит обработанные детали в сборочный цех. Исследуемая производственная система смоделирована и проанализирована в программном комплексе имитационного моделирования Plant Simulation. Анализ имитационной модели показал основные направления оптимизации исследуемой системы: расписание перемещений транспортной тележки и очередь поступления заготовок в производство. Ввиду трудности многокритериальной оптимизации стандартными средствами программного комплекса, решено использовать встроенный API-интерфейс Plant Simulation. В работе описана и приводится схема работы динамической библиотеки оптимизации. Описываются основные проблемы разработки динамической библиотеки на C++. В результате работы получены оптимизированные расписание перемещений транспортной тележки и очередь поступления заготовок в производство

Ключевые слова: имитационное моделирование, оптимизация, интерфейс, динамическая библиотека

Введение

Большинство научных работников технической сферы в определенной мере связано с различными этапами исследований, разработки и внедрения в производство современных информационных технологий. Такие технологии, прежде всего, призваны обеспечить информационную поддержку всех областей работы производственной системы.

Одной из важнейших задач, решаемых с использованием информационных технологий на предприятиях, является оптимизация работы производственной системы. При этом оптимизация может быть как комплексной, так и решать локальные задачи производственных подразделений. В зависимости от типа задачи для ее решения может использоваться определенный инструментарий, реализованный в программных комплексах. Так, например, для решения задач автоматизации и оптимизации технологической и конструкторской подготовки используются системы поддержки жизненного цикла изделия.

Для оптимизации непосредственно производственной части предприятия эффективно использование программных комплексов имитационного моделирования. Такие комплексы позволяют создавать имитационную модель подразделения, которая будет с высокой точностью повторять поведение реальной системы. С использованием имитационной модели можно оптимизировать работу производственного подразделения с учетом множества различных критериев.

Одним из наиболее удобных и функциональных комплексов имитационного моделирования предприятия является Tecnomatix Plant Simulation. Наличие множества встроенных объектов и встроенного языка программирования позволяет создавать имитационные модели любой сложности и любого масштаба.

Литературный обзор и актуальность работы

В настоящее время в отечественных и зарубежных научных публикациях представлен достаточный опыт применения Plant Simulation для решения различных производственных задач [1,2,3]. В представленных публикациях с использованием стандартных средств программного комплекса создаются и исследуются имитационные модели реальных производственных систем.

Следует также отметить, что Plant Simulation доказал свою эффективность применения при исследовании больших производственных систем. Приведенное исследование материальных потоков позволяет обеспечить эффективный поиск узких мест производства, которые

© Гусев П.Ю., Скрипченко Ю.С., Пак А.А., Гусев К.Ю., 2018

нуждаются в оптимизации. На основе этого исследования установлены оптимальные параметры производственной системы для выполнения задач по выпуску продукции.

Приведенные материалы показывают, что применение Plant Simulation полностью оправдано в случаях оптимизации сложных производственных систем с множеством пересекающихся материальных потоков. Встроенные инструменты оптимизации позволяют находить оптимальные решения описываемых задач. Однако учитывая всю специфику производственной отрасли, невозможно создать универсальный инструмент оптимизации, который бы справился с решением любой задачи [4].

Для обеспечения возможности решения любых возникающих задач оптимизации в программном комплексе Plant Simulation предусмотрен API-интерфейс. Использование этого интерфейса позволяет решать такие задачи, на которые невозможно настроить стандартные объекты Plant Simulation. В настоящее время вопрос применения API-интерфейса Plant Simulation для решения практических задач не изучен. В связи с этим сформулирована цель работы: повышение эффективности оптимизации элементов производственных подразделений с использованием возможностей API-интерфейса Plant Simulation.

Разработка имитационной модели

В качестве исследуемой производственной системы выступил участок механической обработки. На исследуемом участке обработку проходят детали из двух видов материалов: из титана и из алюминия. При этом детали каждого вида материала делятся на два типоразмера: большие и малые.

Все детали обрабатываются обрабатывающими центрами DMU. Обрабатывающие центры при этом имеют разный размер – DMU 80 и DMU 125. Детали большего типоразмера могут обрабатываться только DMU 125, меньшего типоразмера любым обрабатывающим центром. При смене вида материала детали требуется переустановка инструмента. Время выполнения переустановки инструмента зависит от типоразмера детали и длительности обработки.

Транспортная система участка механической обработки представлена транспортной тележкой. Транспортная тележка доставляет заготовки на входной буфер обрабатывающего центра со склада заготовок, а затем увозит готовые детали в сборочный цех. Моделирование сборочного цеха в данной работе не рассматривается, т.к. не ведет к достижению поставленной цели.

Первый этап моделирования исследуемой производственной системы – разработка структуры имитационной модели. Правильно разработанная структура модели позволяет быстро и с минимальной трудоемкостью вносить необходимые уточнения в модель, а также оперативно проводить анализ результатов. В разработанной имитационной модели применена структура иерархического типа. Каждый объект, моделирующий определенный компонент производственной системы, имеет свой родительский объект. Это позволяет изменять поведение набора объектов с помощью изменения свойств одного объекта.

Для сбора статистических данных по работе модели на каждый объект, моделирующий обрабатывающий центр, предусмотрен объект, записывающий историю обработки. На основе этих данных можно сделать выводы как об эффективности работы моделируемой системы, так и составить производственный план подразделения. На рис. 1 представлен фрагмент разработанной имитационной модели.

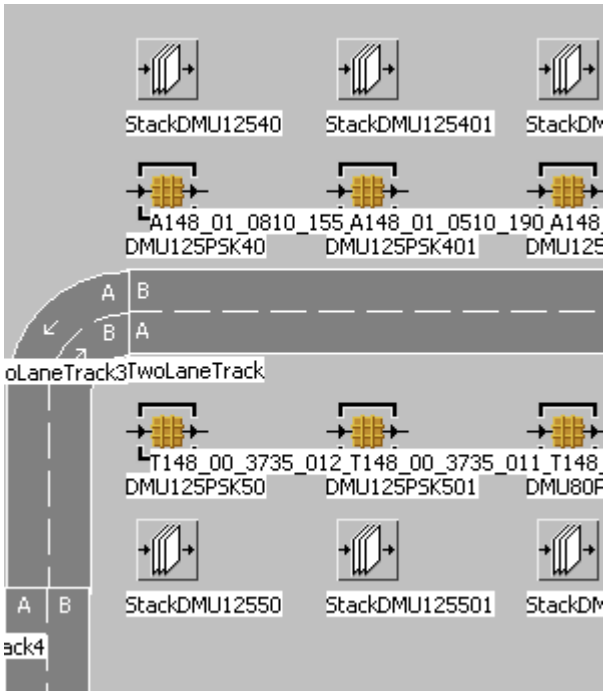


Рис. 1. Фрагмент имитационной модели участка механической обработки

Анализ имитационной модели

Разработанная имитационная модель верифицирована с помощью реальных данных производительности участка механической обработки за месяц. Таким образом, можно утверждать, что результаты, получаемые с помощью имитационной модели, могут использоваться для оптимизации реальной производственной системы.

Проведение анализа имитационной модели ставило следующие задачи:

- оценка загрузки обрабатывающих центров;
- оценка эффективности использования инструмента;
- оценка эффективности использования транспортной системы;
- анализ производственного плана.

Проведенный анализ показал, что имеющегося технологического оборудования достаточно для выполнения текущего производственного плана, а также для выполнения перспективного производственного плана. Однако при этом загрузка оборудования в течение планового периода значительно изменялась. Это связано, прежде всего, с неправильным использованием транспортной системы. Учитывая наличие одной транспортной тележки, могут возникать простои, связанные с ожиданием заготовок.

В разработанной имитационной модели управление транспортной системы смоделировано точно в соответствии с реальной системой. Это позволяет проводить эксперименты, результаты которых могут использоваться для оптимизации реальной производственной системы.

Оптимизация транспортной системы производственного подразделения возможна с использованием стандартных средств Plant Simulation. Однако оптимизация одного компонента производственной системы без учета других составляющих не приведет к искомому результату. Первым делом также требуется оптимизация очереди поступления заготовок. Именно оптимальная очередь поступления заготовок в совокупности с оптимальным расписанием перемещений транспортной тележки позволит увеличить эффективность производственной системы в целом.

Проведенный анализ имитационной модели показал два основных направления оптимизации: уменьшение времени выполнения производственного плана и повышение загрузки оборудования.

Оптимизация транспортной системы производственного подразделения

Ввиду того, что выполнение оптимизации исследуемой производственной системы по двум выделенным направлениям с использованием стандартных средств Plant Simulation затруднено, решено применить API-интерфейс.

API-интерфейс использует динамическую библиотеку, разработанную с помощью языка программирования C++. Динамическая библиотека подключается к программному комплексу непосредственно в момент имитационного прогона. Поэтому применение API-интерфейса для оптимизации транспортной системы в имитационной модели производственного подразделения приводит к появлению дополнительных задач, которые связаны с многократным запуском имитационной модели в процессе оптимизации.

Для оптимизации транспортной системы в работе применен генетический алгоритм. При запуске оптимизации в динамическую библиотеку передается набор изменяемых параметров, а из библиотеки возвращается начальное поколение генотипов. Далее происходит последовательный запуск имитационных экспериментов с каждым генотипом. В результате имитационных экспериментов составляется массив, содержащий значение функции приспосабливаемости для каждого генотипа. Функция приспосабливаемости в разработанной модели вычисляется на основе средней загрузки всех обрабатывающих центров и общего времени выполнения производственного плана.

По окончании каждой серии имитационных экспериментов данные снова передаются в динамическую библиотеку, где происходят стандартные для генетического алгоритма операции скрещивания и мутации. Одной из особенностей оптимизации исследуемой системы является остановка оптимизации исключительно по достижению заданного количества поколения. Связано это, прежде всего, с тем, что заранее невозможно предугадать оптимальное время прохождения производственного плана.

Общая схема оптимизации транспортной системы производственного подразделения с применением API-интерфейса Plant Simulation представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема оптимизации с применением динамической библиотеки

Отдельно следует описать принципы работы API-интерфейса. Plant Simulation предоставляет готовый проект C++, который можно использовать в качестве заготовки будущей динамической библиотеки. Однако в документации отсутствует информация по применению готового проекта. Главной проблемой при разработке динамической библиотеки выступает передача данных. Ввиду того, что типы переменных в языке C++ и встроенном языке Simtalk различаются, то требуется подбор соответствия типов опытным путем.

Удобство использования динамической библиотеки заключается в том, что основные операции по поиску оптимальных значений можно использовать также из других библиотек. Которые, в свою очередь, будут вызываться из разработанной динамической библиотеки.

В результате проведенной оптимизации получено оптимальное расписание перемещений транспортной тележки. Все перемещения привязаны к оптимальному порядку поступления заготовок на участок механической обработки. Полученные данные позволили уменьшить время выполнения производственного плана на 10% и увеличить загрузку оборудования на 15%.

Выводы

Оптимизация производственных систем представляет собой сложную многофакторную задачу, которую не всегда удается решить даже с применением современных программных средств. В таких случаях лучшим решением является разработка своих алгоритмов оптимизации для конкретных задач. Программный комплекс имитационного моделирования позволяет значительно сократить время на разработку модели системы и упрощает проведение экспериментов.

В результате проведенной работы разработаны алгоритмы взаимодействия с динамическими библиотеками и достигнута основная цель работы - повышение эффективности оптимизации элементов производственных подразделений с использованием возможностей API-интерфейса Plant Simulation.

Литература

1. Use of plant simulation for improvement technological and business processes of metallurgical manufacture/ B. Klebanov et al. //Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese. IEEE, 2016. С. 9681-9684.

2. Malega P., Kadarova J., Kobulnicky J. Improvement of production efficiency of tapered roller bearing by using Plant Simulation //International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM). 2017. Т. 16. №. 4.

3. Собенина О.В., Пак А.А. Разработка имитационной модели участка механической обработки // Современные материалы, техника и технологии. 2016. №4(7). С. 164-167.

4. Бредихин А.В., Тютин С.В., Школьник Ю.М. Автоматизация инструментального хозяйства в концепции интернет-вещей; под ред. Н.А. Тюкачева // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XVI Междунар. науч.-метод. конф. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2016. С. 286-289.

Поступила 21.06.2018; принята к публикации 10.09.2018

Информация об авторах

Гусев Павел Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-952-55-11-640, e-mail: GusevPvl@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3752-0152

Скрипченко Юрий Степанович - канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8(473)255-42-48, e-mail: skripch@yandex.ru

Пак Алла Анатольевна – старший преподаватель кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8(473)255-42-48

Гусев Константин Юрьевич - канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8(473)243-77-20

USING THE PLANT SIMULATION API FOR OPTIMIZING THE TRANSPORT SYSTEM OF THE PRODUCTION DEPARTMENT

P.Yu. Gusev, Yu.S. Skripchenko, A.A. Pak, K.Yu. Gusev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the issue of optimizing the transportation system of the production unit using the Plant Simulation software complex is considered. The site of mechanical processing is used as the system under study. DMU machining centers are located in the studied machining area. The complexity of modeling the study area is due to the processing of parts made of several types of materials, as well as the presence of several sizes. The transport system of the machining section is represented by a transport trolley. The site has one transport cart that delivers blanks for processing, and also takes the machined parts to the assembly hall. The production system under study is modeled and analyzed in the Plant Simulation software package. The analysis of the simulation model showed the main directions of optimization of the system under study: the schedule of movements of the transport carriage and the queue of receipt of blanks in production. Due to the difficulty of multi-criteria optimization using standard software tools, it was decided to use the built-in API Plant Simulation. The article describes and provides a diagram of the work of the dynamic optimization library. The basic problems of developing a dynamic library in C++ are described. As a result of the work, an optimized schedule of movement of the transport trolley and the queue of receipt of blanks in production were obtained

Key words: simulation, optimization, interface, dynamic library

References

1. Klebanov B. et al. “Use of plant simulation for improvement technological and business processes of metallurgical manufacture”, *Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese, IEEE*, 2016, pp. 9681-9684.

2. Malega P., Kadarova J., Kobulnicky J. “Improvement of production efficiency of tapered roller bearing by using Plant Simulation”, *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 2017, vol. 16, no. 4.

3. Sobenina O.V., Pak A.A. “Development of the simulation model of the machining site” , *Modern materials, techniques and technologies (Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii)*, Kursk,2016, no. 4(7), pp. 164-167.

4. Bredikhin A.V., Tyutin S.V., Shkol’nik Yu.M. “Automation of tool management in the concept of Internet things; by ed. ON. Tyukacheva”, *Informatics: problems, methodology, technology: materials of the XVI Intern. scientific method. conf. Voronezh (Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-metod. konf. Voronezh)*, Voronezh State University, 2016, pp. 286-289.

Submitted 21.06.2018; revised 10.09.2018

Information about the authors

Pavel Yu. Gusev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Technologies, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-952-55-11-640, e-mail: GusevPvl@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3752-0152

Yurii S. Skripchenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8(473)255-42-48, e-mail: skripch@yandex.ru

Alla A. Pak, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8(473)255-42-48

Konstantin Yu. Gusev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8(473)243-77-20

УДК 004.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АРХИТЕКТУР КРОССПЛАТФОРМЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В.Н. Черников, С.Л. Подвальный, В.Ф. Барабанов, В.В. Сафронов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: дано описание архитектур, наиболее распространённых в производственной практике наборов инструментов и библиотек для кроссплатформенной разработки. Приведен обзор механизмов операционных систем, которые используют выбранные инструменты. Проведено сравнение кроссплатформенных инструментов с точки зрения архитектуры. Рассмотрены механизмы интеграции кроссплатформенной и платформозависимых частей программного продукта, а также указаны «узкие места» данных механизмов. Приведены рекомендации, которые позволяют определиться с выбором кроссплатформенного инструмента в различных командах инженеров. Рассмотрен такой класс программного обеспечения, как мобильные приложения. Смартфоны и планшеты набирают все большую популярность, вытесняя бумажные носители и стационарные компьютеры, предоставляя бизнес-подразделениям возможность использовать новые каналы и способы обмена информацией с клиентами и сотрудниками. В работе проведен сравнительный анализ наиболее популярных инструментов: PhoneGap, ReactNative, Xamarin и Qt. В качестве целевых платформ рассмотрены операционные системы iOS, Android и Windows UWP. Проведён детальный анализ архитектур кроссплатформенного программного обеспечения в части обоснования использования инструментов кроссплатформенной разработки; архитектуры и интерфейсов для интеграции операционных систем (iOS, Android, Windows UWP); архитектуры кроссплатформенных приложений (PhoneGap, ReactNative, Qt, Xamarin). Сформированы общие рекомендации по выбору инструмента разработки кроссплатформенных приложений

Ключевые слова: кроссплатформенная разработка, мобильные приложения, архитектуры компьютерных систем

Введение

Кроссплатформенные инструменты и библиотеки активно используются при разработке широкого класса программного обеспечения. Однако все инструменты имеют свои ограничения и важно их понимать при вводе в промышленное использование.

Далее будет рассмотрен такой класс программного обеспечения, как мобильные приложения. Смартфоны и планшеты набирают все большую популярность, вытесняя бумажные носители и стационарные компьютеры, предоставляя бизнес-подразделениям возможность использовать новые каналы и способы обмена информацией с клиентами и сотрудниками.

В отличие от рынка стационарных компьютеров, где доминирует Windows, на рынке мобильной разработки есть 2 ведущие платформы: Apple iOS и Google Android. С целью оптимизации расходов, увеличения скорости разработки и утилизации существующих компетенций все шире начинают использоваться инструменты кроссплатформенной мобильной разработки.

В данной работе проведен сравнительный анализ наиболее популярных инструментов: PhoneGap, ReactNative, Xamarin и Qt. В качестве целевых платформ мы будем рассматривать операционные системы iOS, Android и Windows UWP.

1. Обоснование использования инструментов кроссплатформенной разработки

Исторически на рынке компьютеров всегда была конкуренция, и каждый производитель предоставлял оптимальный набор так называемых «нативных» (родных) инструментов для разработки приложений под свои операционные системы и устройства. “Нативные” средства разработки обеспечивают максимальную производительность и доступ к возможностям операционной системы.

Однако часто оказывалось, что эти инструменты были несовместимы друг с другом не только на уровне языка разработки, принятых соглашений и архитектур, но и на уровне механизмов работы с операционной системой и библиотеками. В результате для реализации одних и тех же алгоритмов, пользовательских или бизнес-сценариев требовалось написать приложение для нескольких сред на разных языках программирования.

Вторым важным моментом является наличие необходимых компетенций (знаний и опы-

© Черников В.Н., Подвальный С.Л., Барабанов В.Ф., Сафронов В.В., 2018

та) внутри команды – если их нет, то потребуется время на обучение.

Для того чтобы решить обе этих проблемы, на рынке появились инструменты кроссплатформенной разработки, предлагающие:

- максимизировать общую базу кода на едином языке программирования, чтобы продукт было проще разрабатывать и поддерживать;
- использовать существующие компетенции и специалистов для реализации приложений на новых платформах.

Итак, «нативные» инструменты предоставляются самими владельцами экосистем и позволяют получить полный доступ к возможностям целевых операционных систем, имеют полный доступ к системным API, оптимальную производительность и требуют отдельной команды разработки под каждую платформу.

Кроссплатформенные инструменты позволяют сократить трудозатраты и ускорить выпуск приложений в том случае, если требуется поддержка нескольких платформ одновременно и имеются (или развиваются) необходимые компетенции. В долгосрочной перспективе кроссплатформенные решения помогут упростить и удешевить развитие программного продукта, но для этого стоит учитывать особенности выбранного инструмента.

2. Архитектура и интерфейсы для интеграции операционных систем

Главный принцип, лежащий в основе кроссплатформенных приложений, - разделение кода на 2 части:

- кроссплатформенную, живущую в виртуальном окружении и имеющую ограниченный доступ к возможностям целевой платформы через специальный мост;
- нативную, которая обеспечивает инициализацию приложения, управление жизненным циклом ключевых объектов и имеющую полный доступ к системным API.

Общая архитектура кроссплатформенных приложений показана на рис. 1.

Для связи между “нативной” и “кроссплатформенной” частями, необходимо использовать специальный мост (bridge), который и определяет возможности и ограничения кроссплатформенных инструментов.

Все кроссплатформенные приложения обязаны иметь нативную часть, поэтому давайте рассмотрим, какие системные API предоставляются самими iOS, Android и Windows.

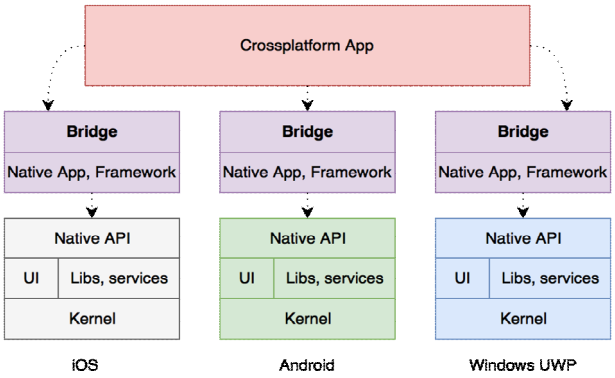


Рис. 1. Общая архитектура кроссплатформенного приложения

2.1. Архитектура iOS

Нативные интерфейсы низкого уровня в iOS реализованы по аналогии с Unix (для C). Для iOS-разработчика выбор языков ограничивается Objective C и Swift, ведь именно для них реализованы нативные инструменты и API. Общая архитектура iOS представлена на рис. 2.

Дополнительно на схеме мы отметили компоненты, которые имеют значение для кроссплатформенных фреймворков:

- WebKit используется в гибридных приложениях на базе PhoneGap или аналогов для запуска приложений и фактически выступает средой выполнения веб-приложений [1];
- JavaScript Core используется в ReactNative и аналогах для быстрого выполнения JS-кода и обмена данными между Native и JS [2];
- OpenGL ES используется в играх и приложениях на Qt/QML или аналогах для отрисовки интерфейса [3];
- UIKit отвечает за нативный пользовательский интерфейс приложения, что актуально для ReactNative и Xamarin.

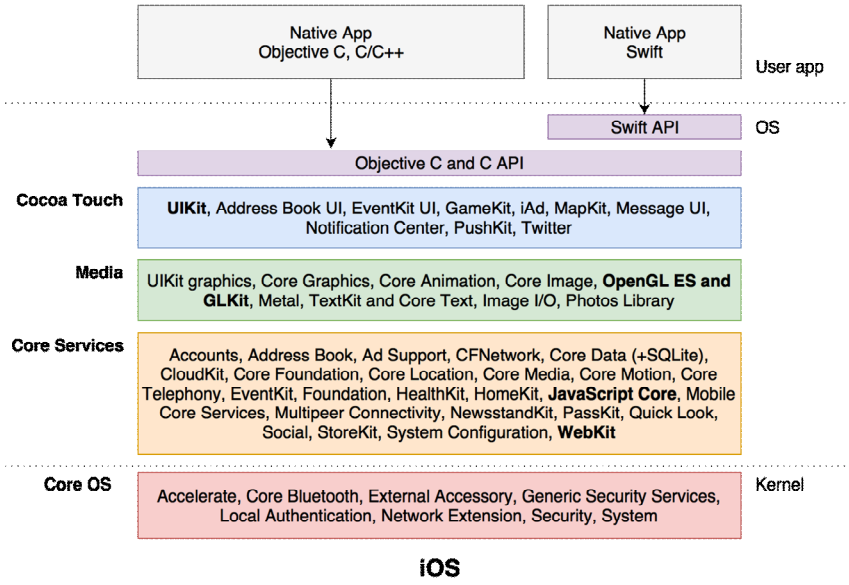


Рис. 2. Архитектура iOS

2.2. Архитектура Android

Android также является Unix-системой и большей частью основан на Linux. В Android, поверх ядра Linux создана своя инфраструктура, включающая виртуальную машину Java (Java Virtual Machine, JVM) для запуска приложений. JVM выступает посредником между пользовательским кодом и набором системных API, доступных для Java-приложений. Поддержка языка Kotlin является надстройкой над той инфраструктурой, которая доступна Java. На рис. 3 показана архитектура Android.

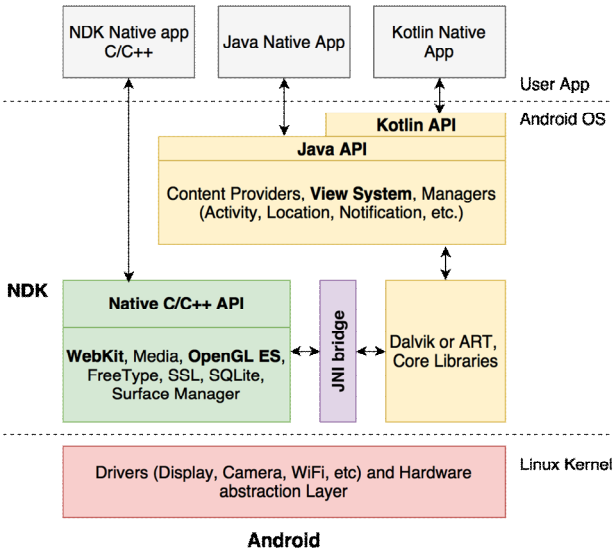


Рис. 3. Архитектура Android

В Android разработчику доступно сразу целых 2 подсистемы: Native Development Kit (Android NDK) и Android SDK.

С помощью NDK можно получить доступ к низкоуровневым механизмам Android. Разработка ведется на C/C++.

При использовании Android SDK разработчик оказывается внутри Java-машины Dalvik (или Android Runtime, ART) и имеем только те возможности, которые предоставляет Java API.

Связующим звеном между библиотеками низкого уровня (на C/C++) и инфраструктурой Java выступает специальный JNI bridge (Java Native Interface), который и позволяет двум мирам взаимодействовать друг с другом. JNI выступает единым и универсальным связующим звеном, однако, как и любой мост, ведет к падению производительности приложения.

Помимо JNI bridge, в архитектуре Android также стоит выделить наличие подсистем WebKit (для PhoneGap), OpenGL ES (для Qt и игр) и View System (для ReactNative и Xamarin), аналогичные модулям в iOS.

2.3. Архитектура Windows UWP

В заключение давайте рассмотрим архитектуру Windows, которая предоставляет большое количество различных интерфейсов и механизмов взаимодействия с операционной системой. Архитектура Windows показана на рис. 4.

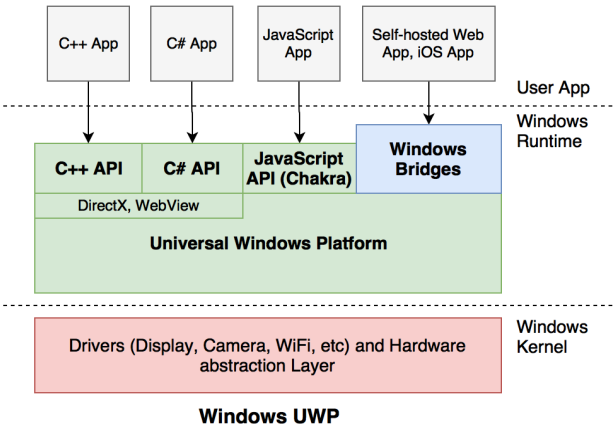


Рис. 4. Архитектура Windows

Помимо API для C++/C#, Windows UWP также предоставляет механизмы работы с JavaScript на базе модуля Chakra. Microsoft также поддерживает версию ReactNative на Windows UWP.

В системе доступен компонент WebView, необходимый PhoneGap. Реализации OpenGL ES нет, вместо нее доступен DirectX [4, 5].

3. Архитектуры кроссплатформенных приложений

Все операционные системы имеют те или иные технические возможности по запуску кроссплатформенных приложений. Самое простое с технической точки зрения - использование WebView, которое есть у всех ОС (актуально для PhoneGap). Вторым вариантом является использование механизмов низкого уровня (например, OpenGL ES и языка C/C++), это позволит разделять между проектами большинство логики (в играх или Qt), но будет ограниченно работать (или не работать) на Windows UWP. Если же необходим полный доступ к возможностям целевых операционных систем (ОС), то здесь начинают задействоваться системные API верхнего уровня - такой подход реализуется только в Xamarin и ReactNative.

Чтобы лучше понять возможности и ограничения каждого из фреймворков, давайте рассмотрим, как архитектурно они устроены и какие из этого следуют возможности и ограничения.

3.1. Архитектура PhoneGap

Решения на базе PhoneGap используют WebView и являются простыми с точки зрения реализации: создается небольшое «нативное» приложение, которое отображает встроенный веб-браузер и открывает в нем HTML-файл из ресурсов приложения. Из кода HTML нет прямого доступа к системным API, поэтому необходимо к WebView и HTML-коду подключать библиотеки, которые добавляют интерфейсы доступа к системной функциональности через объекты и классы JavaScript. На рис. 5 показана архитектура PhoneGap.

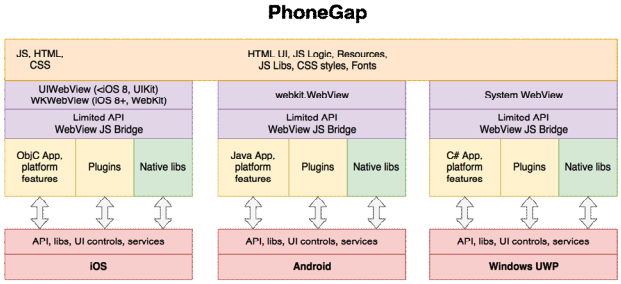


Рис. 5. Архитектура приложения на PhoneGap

Как видим, PhoneGap позволяет разделять практически весь код между платформами, однако все еще требуется реализация нативной части на Objective C и Java (и C# для Windows). Весь жизненный цикл приложения проходит внутри WebView.

Пользовательский интерфейс организован по принципу одностраничного HTML - в реальных приложениях со сложным интерфейсом будут подергивания и подтормаживания (особенности мобильных WebView, которые еще и могут отличаться у разных производителей). Для передачи данных через мост их необходимо сериализовать/десериализовать в Json. В целом мост используется редко, так как вся жизнь приложения проходит внутри WebView.

3.2. Архитектуры ReactNative

ReactNative дает возможность использовать скриптовый язык программирования JavaScript для описания интерфейса пользователя и логики работы приложений. Сам по себе код на JavaScript обеспечивает производительность, сопоставимую с нативной. Однако и в архитектуре ReactNative присутствует мост, снижающий скорость работы с платформенной функциональностью и UI. На рис. 6 показана архитектура ReactNative.

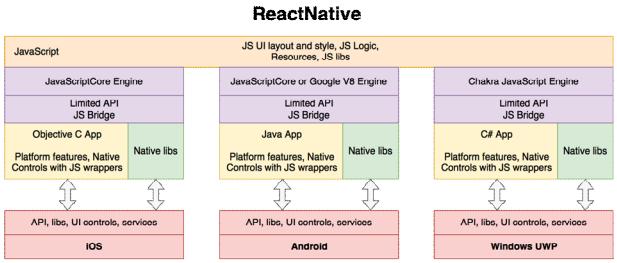


Рис. 6. Архитектура приложения на ReactNative

При создании приложений на ReactNative разработчику будет необходимо также реализовывать нативную часть на Objective C, Java или C#, которая инициализирует модуль исполнения кода на JavaScipt и передает в него нужные файлы из ресурсов приложения. Далее пользовательский код на JavaScript переключает на себя управление жизненным циклом и созданием пользовательского интерфейса [6, 7].

Для передачи данных и вызовов между кодом на JavaScript и нативной частями приложение также использует мост. Важно отметить, что для передачи сложных структур данных и классов между нативной частью и кодом на JavaScript их необходимо сериализовать/десериализовать в формате JSON.

3.3. Qt

Архитектура Qt позволяет портировать его в те операционные системы, которые имеют API для C++. И iOS, и Android (NDK), и Windows такой возможностью обладают, хотя и все со своими особенностями.

Один из главных плюсов Qt - собственная эффективная система отрисовки пользовательского интерфейса либо на базе растрового движка (например, CoreGraphics в iOS), либо на базе Open GL (ES). Именно это и делает фреймворк портируемым на новые операционные системы и среды исполнения. На рис. 7 показана архитектура Qt.

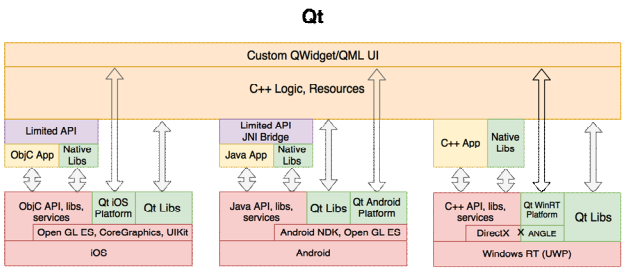


Рис. 7. Архитектура приложения на Qt

На iOS используются стандартные модули CoreGraphics и UIKit для отрисовки пользовательского интерфейса. В Android используются механизмы NDK для отрисовки UI, а для доступа к Java API и управления приложением используется уже знакомый нам мост JNI. Также в iOS и Android может использоваться Open GL ES для отрисовки QML или работы с 3D.

В Windows имеется прямой доступ к C++ API, но нет реализации Open GL (ES), поэтому необходимо использовать конвертацию вызовов Open GL ES в вызовы DirectX.

Важно отметить, что пользовательский интерфейс приложений на основе Qt не является нативным, а только делается похожим на него с помощью стилизации.

3.4. Xamarin

Xamarin является открытой реализацией инфраструктуры .NET для Unix-систем. Для взаимодействия с родными (для C) интерфейсами операционных систем в Mono используется механизм P/Invoke. На основе Mono были созданы фреймворки MonoTouch и MonoDroid, которые затем переименовали в Xamarin.iOS и Xamarin.Android, и теперь вместе называют “классическим Xamarin” (Xamarin Classic).

Классический Xamarin предоставляет полный доступ к системным API, то есть можно создавать нативные приложения iOS/Android. Нативные библиотеки подключаются через механизм байндинга (Native Library Binding). Взаимодействие с ОС происходит через мост и механизм оберток (wrappers), однако нет необходимости сериализовать данные, так как осуществляется автоматический маршалинг и есть возможность прямой передачи ссылок между средами Mono Managed и Native. На рис. 8 показана архитектура Xamarin.

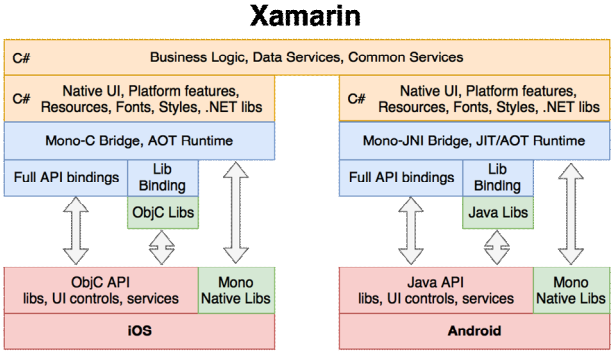


Рис. 8. Архитектура приложения на Xamarin

Производительность кода на C# сопоставима с производительностью нативного кода в iOS/Android, но при взаимодействии с ОС используется мост, который может замедлять приложение при неэффективном использовании.

Приложение на Xamarin.iOS / Xamarin.Android обычно состоит из shared (общей) части, которая упаковывается в .NET-библиотеку (dll) и платформенной части, которая имеет полный доступ к API, включая нативный пользовательский интерфейс. В платформенной части содержатся описание экранов, ресурсы, стили, шрифты - практически 100% структура нативного проекта на Objective C или Java, или на C#.

Заключение

В работе были рассмотрены особенности кроссплатформенных фреймворков с точки зрения архитектуры. Сами по себе кроссплатформенные приложения сопоставимы с нативными, однако необходимость использования моста снижает скорость при взаимодействии с системными API.

При выборе фреймворка стоит учитывать не только язык программирования, но и необходимый уровень знаний целевых операционных систем (iOS, Android, Windows), а также опираться на опыт команды разработчиков. Например, при использовании PhoneGap можно обойтись без глубоких знаний особенностей различных ОС. А для Xamarin Classic придется стать экспертом в iOS и/или Android.

Общие рекомендации по выбору инструмента разработки кроссплатформенных приложений:

- PhoneGap - если необходимо быстро сделать простое приложение или прототип и в команде есть опыт разработки одностраничных веб-приложений (HTML, JavaScript, CSS). В большинстве случаев можно найти готовые сторонние компоненты для нативной функциональности. Из минусов - неродной пользовательский интерфейс с частыми «подергиваниями и залипаниями», а также непростой доступ к нативной части. Процент разделяемого кода - до 95%;

- ReactNative - подойдет для опытных JavaScript-разработчков и команд, но потребует достаточно хорошего знания iOS Objective C API и Android Java API. Приложения выглядят и работают нативно. Процент разделяемого кода - до 90%;

- Xamarin Classic - для опытных C#-разработчиков, которым потребуется глубоко освоить iOS и Android. Приложения будут полностью нативными, но написаны на C#. Объем общей базы кода в редких случаях превышает 40%;

- Qt - этот фреймворк можно рекомендовать только в случае, если уже есть существующее приложение (например, для встраиваемых систем) и его необходимо запустить на iOS/Android. Высокие требования к квалификации разработчиков, непростой доступ к нативной функциональности и неродной UI являются заметными минусами фреймворка. Процент разделяемого кода может доходить до 95%.

Литература

1. Tavakkoli Alireza. Game Development and Simulation with Unreal Technology. Boca Raton: CRC Press. 2016. 427 p.

2. Shekar Siddharth. Cocos2d Cross-Platform Game Development Cookbook. Packt Publishing Ltd. 2014. 266 p.

3. Скит Джон. C# для профессионалов: тонкости программирования; пер. с англ. Ю. Н. Артеменко. Изд. 3-е. М.: Вильямс, 2014. 608 с.

4. Hocking Joseph. Unity in Action. Multiplatform game development in C# with Unity 5. Manning, 2015. 352 p.

5. Торн Алан. Искусство создания сценариев в unity; пер. с англ. Р. Н. Рагимова. М.: ДМК-Пресс, 2016. 360 с.

6. Интеграционные решения при построении корпоративных информационных систем / В.В. Сафронов и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18. № 4(3). С. 646-654.

7. Модульное построение распределённой информационной системы машиностроительного предприятия / В.В. Сафронов и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 4. С. 44-50.

Поступила 25.06.2018; принята к публикации 15.09.2018

Информация об авторах

Черников Вячеслав Николаевич – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: slava.chernikoff@live.com

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: spodvalny@yandex.ru

Барабанов Владимир Федорович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvf@list.ru
Сафронов Виталий Владимирович – канд. техн. наук, зав. лабораторией, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: safronov.vitaliy@mail.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF ARCHITECTURES OF CROSS-PLATFORM SOFTWARE

V.N. Chernikov, S.L. Podvalny, V.F. Barabanov, V.V. Safronov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article describes the architecture, that is the most common in the practice of toolkits and libraries for cross-platform development. An overview of the mechanisms of operating systems that use selected tools is given. Comparison of cross-platform tools in terms of architecture is done. The mechanisms of integration of cross-platform and platform-independent parts of the software product are considered, and the "bottlenecks" of these mechanisms are indicated. The recommendations are given, which allow to determine the choice of cross-platform tools in different teams of engineers. This class of software is considered as mobile applications. Smartphones and pads are gaining popularity, displacing treeware and stationary computers, giving business units the opportunity to use new channels and ways to exchange information with customers and employees. The article compares the most popular tools: PhoneGap, ReactNative, Xamarin and Qt. The target platforms are iOS, Android and Windows UWP operating systems. A detailed analysis of cross-platform software architectures in part: a substantiation of the use of cross-platform development tools; architecture and interfaces for the integration of operating systems (iOS, Android, Windows UWP); architecture of cross-platform applications (PhoneGap, ReactNative, Qt, Xamarin). General recommendations on the choice of the tool for developing cross-platform applications have been formed

Key words: cross-platform development, mobile applications, architecture of computer systems

References

1. Tavakkoli Alireza "Game Development and Simulation with Unreal Technology", CRC Press, Boca Raton, 2016, 427 p.
2. Shakar S. "Cocos2d cross-platform game development cookbook", Packt Publishing Ltd, 2014, 266 p.
3. Skeet J. "C# for professionals: the subtleties of programming", trans. from English by Artemenko Yu.N., Moscow, Williams, 2014, 608 p.
4. Hocking J. "Unity in action. Multiplatform game development inC# with Unity 5", Manning, 2015, 352 p.
5. Thorne A. "The Art of scripting in Unity", trans. from English by Ragimov R.N., Moscow, DMK-Press, 360 p.
6. Safronov V.V. et al. "Integration solutions in the construction of corporate information systems", *Proceedings of the Samara scientific center of RAS (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN)*, 2016, vol. 18, no. 4 (3), pp. 646-654.
7. Safronov V.V. et al. "Modular building systems engineering distributed information companies", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 44-50.

Submitted 25.06.2018; revised 15.09.2018

Information about the authors

Vyacheslav N. Chernikov, Seeker, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: slava.chernikoff@live.com
Semyen L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru
Vladimir F. Barabanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvf@list.ru
Vitaliy V. Safronov, Cand. Sc. (Technical), Laboratory Manager, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: safronov.vitaliy@mail.ru

УДК 621.865

МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ КВАДРОКОПТЕРА ПОСРЕДСТВОМ ВЫПУКЛОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

С.И. Савин[1], Л.Ю. Ворочаева[1], А.И. Савин[2]

[1] Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия
[2] АО «Авиаавтоматика» им. В.В. Тарасова, г. Курск, Россия

Аннотация: рассматривается задача управления четырёхроторным автономным летательным аппаратом – квадрокоптером. Описан метод генерации траекторий для квадрокоптера, основанный на использовании методов численной оптимизации и алгебраических подходов к определению последовательности ориентаций робота. Показано, что задача генерации траекторий может быть представлена как задача выпуклого программирования. Решение задачи выпуклого программирования в данном случае используется для формирования последовательности положений центра масс устройства и векторов сил, которые должны быть приложены к квадрокоптеру для его перемещения из текущего положения в следующее, с учетом динамики летательного аппарата. Информация об ориентации векторов приложенных к квадрокоптеру сил может быть использована для определения последовательности его ориентаций. В работе предложен метод, позволяющий вычислять эти ориентации, описаны необходимые допущения. Для получения задающих воздействий для системы управления по обратной связи используется интерполяция данных, полученных решением задачи оптимизации для дискретного набора положений робота. Следящая система управления реализована с использованием итеративного линейного квадратичного регулятора. Результаты математического моделирования свидетельствуют о том, что квадрокоптер отрабатывает полученные описанным методом траектории и устойчив по отношению к ошибкам своего начального положения

Ключевые слова: квадрокоптер, метод генерации траекторий, выпуклое программирование, устойчивость, траектория центра масс

Введение

Задача управления квадрокоптерами – винтокрылыми летательными аппаратами, оснащенными четырьмя движителями – стала классической для теории управления мобильными роботами [1]. При этом такие аппараты представляют не только теоретический, но и практический интерес. Квадрокоптеры и их модификации используются для выполнения аэрофотосъемки, мониторинга состояния окружающей среды, оценки состояния инженерных конструкций и зданий и др. [1-4]. Сферы использования квадрокоптеров постоянно расширяются, при этом существенным ограничением, препятствующим их более широкому использованию, являются недостаточно развитые методы управления такого рода механизмами [3, 4].

Вопросами управления квадрокоптерами занимается ряд научных групп, которые достигли существенных результатов. Так, в работе [1] рассматриваются методы математического моделирования и идентификации параметров математической модели для квадрокоптера. В публикации [4] описаны основные зависимости, характеризующие механические параметры квадрокоптера, предложена двухуровневая модель его системы управления. В статье [5] предложена трехуровневая структура системы управления квадрокоптера. В работе [6] проведен сравнительный анализ работы систем управления квадрокоптера, основанных на линейном квадратичном и пропорционально-интегрально-дифференциальном регуляторах.

В последних трех упомянутых работах использовались системы управления с обратными связями, реализующие управление по ошибке. В работе [7] предложено использовать MPC (от англ. modelpredictivecontrol) управление. Показана эффективность предложенного метода управления, в том числе в присутствии ветра. В статье [8] проводится сравнение FL (от англ. feedbacklinearization) и SMC (от англ. sliding-modelcontrol) методов управления применительно к задаче управления квадрокоптером.

Описанные выше статьи посвящены решению задачи управления квадрокоптером, имеющим заданную траекторию движения. На практике построение такой траектории является относительно сложной задачей. Существует несколько подходов к решению этой проблемы. Первый состоит в использовании человека в качестве оператора системы. Так, в работе [9] описан способ управления квадрокоптером посредством сенсорной системы Kinect, используемой для распознавания жестов оператора, а

© Савин С.И., Ворочаева Л.Ю., Савин А.И., 2018

в публикации [10] – метод получения информации о намерениях оператора, основанный на данных электроэнцефалограммы и отслеживании направления взгляда оператора. Использование столь сложных подходов обусловлено тем, что эффективная работа квадрокоптера связана с динамическим движением в трехмерном пространстве при том, что оператор остается на земле. Эти сложности указывают на то, что более эффективным может быть второй подход к решению задачи построения траекторий квадрокоптера – их автоматическая генерация.

В статье [11] описан метод генерации траекторий квадрокоптера, использующий принцип максимума Понтрягина, а также приводится способ оценки реализуемости предложенных траекторий. В работе [12] описан способ, основанный на так называемых ключевых кадрах, представляющих собой положение центра масс квадрокоптера и его угол рыскания. Существуют и другие методы, позволяющие построить траекторию для квадрокоптера.

Здесь мы рассмотрим метод, позволяющий сформулировать задачу генерации траектории центра масс квадрокоптера как задачу выпуклого программирования. Предлагаемый в этой работе метод позволяет учитывать ограничения, накладываемые на положение квадрокоптера, на его ориентацию, а также на величину создаваемых его роторами сил тяги.

1. Описание квадрокоптера

Квадрокоптер представляет собой винтокрылый летательный аппарат с четырьмя несущими винтами с параллельно направленными осями. На рис. 1 приведена расчетная схема такого устройства.

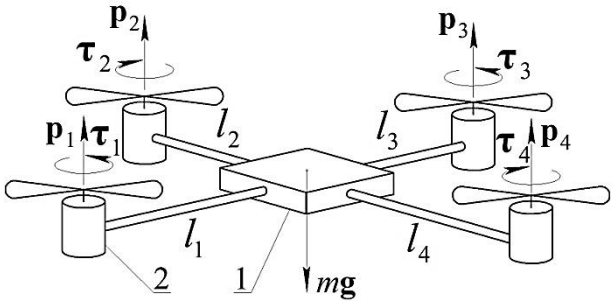


Рис. 1. Расчетная схема квадрокоптера: 1 – корпус, 2 – двигатели с несущими винтами

На рис. 1 использованы следующие обозначения: $\mathbf{p}_i$ – сила тяги, генерируемая i-м несущим винтом ($i = \overline{1,4}$), $\boldsymbol{\tau}_i$ – момент, создаваемый этим винтом, l_i – расстояние от центральной оси симметрии квадрокоптера до оси этого несущего винта, m – масса квадрокоптера, $\mathbf{g}$ – ускорение свободного падения. Полагаем, что ориентация квадрокоптера определяется матрицей направляющих косинусов $\mathbf{T}$, причем эта матрица параметризована с помощью углов Эйлера:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}(\varphi, \theta, \psi). \quad (1)$$

Положение центра масс квадрокоптера обозначено точкой C и определяется радиус-вектором

$$\mathbf{r}_C = [x_C \quad y_C \quad z_C]^{\mathrm{T}}. \quad (2)$$

Подробное описание математических моделей квадрокоптеров можно найти в [1, 13, 14]. Такие математические модели можно построить, опираясь на динамические и кинематические уравнения Эйлера, а также уравнения Ньютона или используя уравнения Лагранжа. Здесь приведем уравнения движения в векторной форме. Для этого введем вектор обобщенных координат $\mathbf{q}$:

$$\mathbf{q} = [x_C \quad y_C \quad z_C \quad \varphi \quad \theta \quad \psi]^{\mathrm{T}}. \quad (3)$$

Тогда уравнения динамики квадрокоптера примут вид:

$$\mathbf{H}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c} + \boldsymbol{\gamma} + \mathbf{d} = \boldsymbol{\Gamma}\mathbf{u}, \quad (4)$$

где $\mathbf{H}$ – обобщенная матрица инерции, $\ddot{\mathbf{q}}$ – вектор обобщенных ускорений, $\mathbf{c}$ – вектор обобщенных инерционных сил, $\boldsymbol{\gamma}$ – вектор обобщенных сил тяжести, $\mathbf{d}$ – вектор обобщенных диссипативных сил, в том числе сил аэродинамического сопротивления, $\mathbf{u} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4]^{\mathrm{T}}$ – вектор сил тяги, $u_i = \|\mathbf{p}_i\|$, $\boldsymbol{\Gamma}$ – матрица, связывающая силы тяги и создаваемые ими обобщенные силы. Подробное описание общих методов составления такого рода уравнения можно найти в [15].

Отметим, что на компоненты вектора $\mathbf{u}$ наложены ограничения, связанные с принципом работы винтов, а также с особенностями работы электродвигателей. В частности,

$$0 \le u_i \le u_{\max}, \; i = \overline{1,4}, \quad (5)$$

где $u_{\max}$ – максимальное значение модуля силы тяги несущего винта.

2. Задача генерации траектории центра масс квадрокоптера

Обозначим желаемую траекторию центра масс квадрокоптера как $\mathbf{r}_C^*(t)$ и примем, что заданы начальная и конечная точки траектории $\mathbf{r}_C^*(t_0)=\mathbf{r}_{C0}$ и $\mathbf{r}_C^*(t_f)=\mathbf{r}_{Cf}$. Также возможно наложение ограничений на скорость центра масс в начальный и конечный моменты времени: $\dot{\mathbf{r}}_C^*(t_0)=\dot{\mathbf{r}}_{C0}$ и $\dot{\mathbf{r}}_C^*(t_f)=\dot{\mathbf{r}}_{Cf}$.

Тогда задача генерации траектории центра масс квадрокоптера сводится к нахождению параметрически заданной кривой $\mathbf{r}_C^*(t)$, проходящей через точки $\mathbf{r}_{C0}$ и $\mathbf{r}_{Cf}$ и удовлетворяющей динамике квадрокоптера (4). Последнее условие означает, что должна существовать такая функция $\mathbf{u}(t)$, удовлетворяющая (5), и такие начальные условия $\mathbf{q}(t_0)$, что соответствующее решение $\mathbf{q}(t)$ уравнения (4) обеспечит движение центра масс квадрокоптера по траектории $\mathbf{r}_C^*(t)$. Далее рассмотрим алгоритм, составляющий аппроксимацию решения данной задачи.

3. Численный алгоритм генерации траектории центра масс квадрокоптера

Для того чтобы найти численное решение задачи генерации траектории центра масс квадрокоптера произведем дискретизацию этой траектории, выделив на ней $N+1$ точек $\mathbf{r}_{C,j}^*$, соответствующих моментам времени t_j, $j=\overline{0,N}$. Обозначим интервалы времени между соседними точками как $\Delta t_j \equiv t_{j+1}-t_j$. Далее введем следующие упрощенные динамические уравнения для центра масс квадрокоптера:

$$m(\ddot{\mathbf{r}}_C+\mathbf{g})=\mathbf{f}, \tag{6}$$

где $\mathbf{f}$ – приведённый вектор сил тяги. Заметим, что эти уравнения не описывают динамику квадрокоптера, в частности, они не учитывают действие аэродинамических сил сопротивления.

Введем вектор фазовых координат для динамической системы (6):

$$\mathbf{s}_{C,j}=[\mathbf{r}_{C,j}^{\mathrm{T}} \quad \dot{\mathbf{r}}_{C,j}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}. \tag{7}$$

Также введем обозначения:

$$\mathbf{A}\equiv\Delta t_j\begin{bmatrix}\mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{I}_{3\times3}\\ \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3}\end{bmatrix},\quad \mathbf{B}_j\equiv\frac{\Delta t_j}{m}\begin{bmatrix}\mathbf{0}_{3\times3}\\ \mathbf{I}_{3\times3}\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h}_j\equiv\Delta t_j\begin{bmatrix}\mathbf{0}_{3\times1}\\ -\mathbf{g}\end{bmatrix}, \tag{8}$$

где $\mathbf{0}_{n\times m}$ и $\mathbf{I}_{n\times m}$ означают нулевую и единичную матрицы, а индексы указывают на их размерность. Используя эти обозначения, перепишем уравнения (6) в дискретной форме в пространстве состояний:

$$\mathbf{s}_{C,j+1}=\mathbf{A}\mathbf{s}_{C,j}+\mathbf{B}_j\mathbf{f}_j+\mathbf{h}_j, \tag{9}$$

где $\mathbf{f}_j$ означает значение вектора $\mathbf{f}$ в момент времени t_j. На векторы $\mathbf{f}_j$ дополнительно наложим ограничение:

$$\left\|\mathbf{f}_j\right\|\le 4u_{\max}. \tag{10}$$

Для того чтобы сформулировать задачу генерации набора точек $\mathbf{s}_{C,j}^*$ введем критерии качества для такого набора. Выберем три критерия. Первым критерием является дистанция между соседними точками. Вторым критерием – разница в скорости между соседними точками. Третьим критерием является модуль вектора $\mathbf{f}_j$ в каждой точке. Эти критерии могут быть записаны как целевая функция V, представляющая собой квадратичную форму $\mathbf{s}_{C,j}^*$ и $\mathbf{f}_j$:

$$V(\mathbf{s}_{C,j}^*,\mathbf{f}_j)=\sum_{j=1}^{N}(\mathbf{s}_{C,j}^*-\mathbf{s}_{C,j-1}^*)^{\mathrm{T}}*$$
$$*\,\mathbf{W}_1(\mathbf{s}_{C,j}^*-\mathbf{s}_{C,j-1}^*)+\sum_{j=1}^{N}\mathbf{f}_j^{\mathrm{T}}\mathbf{W}_2\mathbf{f}_j, \tag{11}$$

где $\mathbf{W}_1$ и $\mathbf{W}_2$ положительно определённые матрицы весовых коэффициентов, имеющие размерность 6x6 и 3x3 соответственно.

Для того чтобы связать задачу генерации точек $\mathbf{s}_{C,j}^*$ с описанной в пункте 2 задачей генерации траектории центра масс, введем краевые условия:

$$\begin{cases}\mathbf{s}_{C,0}=[\mathbf{r}_{C0}^{\mathrm{T}} \quad \dot{\mathbf{r}}_{C0}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}},\\ \mathbf{s}_{C,N}=[\mathbf{r}_{Cf}^{\mathrm{T}} \quad \dot{\mathbf{r}}_{Cf}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}.\end{cases} \tag{12}$$

С учетом (9)–(12) можем сформулировать задачу генерации набора точек $\mathbf{s}_{C,j}^*$ как задачу выпуклого программирования:

$$\text{minimize} \quad V(\mathbf{s}^*_{C,j}, \mathbf{f}_j)$$
$$\text{subject to}: \qquad (13)$$
$$\begin{cases} \mathbf{s}_{C,j+1} = \mathbf{A}\mathbf{s}_{C,j} + \mathbf{B}_j\mathbf{f}_j + \mathbf{h}_j \quad j = \overline{1,N}, \\ \mathbf{s}_{C,0} = [\mathbf{r}_{C0}^{\mathrm{T}} \quad \dot{\mathbf{r}}_{C0}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}, \\ \mathbf{s}_{C,N} = [\mathbf{r}_{Cf}^{\mathrm{T}} \quad \dot{\mathbf{r}}_{Cf}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}, \\ \left\|\mathbf{f}_j\right\| \le 4u_{\max}. \end{cases}$$

В частности, данная задача выпуклого программирования относится к так называемым QCQP (от англ. quadratically constrained quadratic program) задачам. Такие задачи могут быть эффективно решены с использованием методов внутренней точки [16].

Заметим, что условие (10) определяет принадлежность каждого вектора $\mathbf{f}_j$ к сфере радиусом $4u_{\max}$. Исключив это условие или заменив его системой линейных неравенств, аппроксимирующих это ограничение, получим задачу квадратичного программирования, решение которой, как правило, требует меньшего объема вычислений. Кроме того, для решения задач квадратичного программирования разработано значительное количество математических пакетов.

В последующих разделах будет показано, что полученный таким образом набор точек $\mathbf{s}^*_{C,j}$ действительно представляет собой дискретную аппроксимацию решения задачи, описанной в пункте 2.

4. Алгоритм определения ориентации квадрокоптера

Для того чтобы задать положение квадрокоптера в каждый момент времени t_j, достаточно определить положение его центра масс и его ориентацию. Пусть ориентация квадрокоптера в момент времени t_j задана матрицей направляющих косинусов $\mathbf{T}_j$, причем его ориентация $\mathbf{T}_0$ в начальный момент времени известна. Тогда можем воспользоваться решением задачи (13) для определения $\mathbf{T}_j$.

Решение задачи (13) предоставляет нам набор векторов $\mathbf{f}_j$, являющихся аппроксимациями приведенных сил тяги квадрокоптера в процессе выполнения траектории. Так как несущие винты квадрокоптера могут создавать тягу лишь в одном направлении – вдоль нормали к плоскости квадрокоптера, то направление $\mathbf{f}_j$ определяет ориентацию этой плоскости. Например, если для описания ориентации квадрокоптера использовать гироскопические углы, то последовательность $\mathbf{f}_j$ позволит однозначно определить углы прецессии и нутации. В общем случае будем использовать следующий итеративный алгоритм нахождения $\mathbf{T}_j$:

$$\mathbf{T}_j = \mathbf{R}(\alpha_j, \mathbf{e}_j)\mathbf{T}_{j-1}, \qquad (14)$$

где $\mathbf{R}(\alpha_j, \mathbf{e}_j)$ – матрица поворота на угол α_j вокруг оси $\mathbf{e}_j$. Угол α_j и ось $\mathbf{e}_j$ найдем следующим образом:

$$\alpha_j = \cos^{-1}\frac{\mathbf{f}_j \cdot \mathbf{f}_{j-1}}{\left\|\mathbf{f}_j\right\| \cdot \left\|\mathbf{f}_{j-1}\right\|}, \quad \mathbf{e}_j = \frac{\mathbf{f}_{j-1} \times \mathbf{f}_j}{\left\|\mathbf{f}_{j-1} \times \mathbf{f}_j\right\|}. \qquad (15)$$

Формулы (14), (15) имеют следующую интерпретацию. Так как векторы $\mathbf{f}_j$ и $\mathbf{f}_{j-1}$ определяют нормали к плоскости квадрокоптера в моменты времени t_j и t_{j-1}, то угол α_j между ними определяет, на какой угол эта плоскость повернулась за время $\Delta t_{j-1} = t_j - t_{j-1}$. Любое изменение ориентации системы координат можно представить как поворот вокруг фиксированной оси. В данном случае в качестве такой оси выберем единичный вектор $\mathbf{e}_j$, перпендикулярный $\mathbf{f}_j$ и $\mathbf{f}_{j-1}$, который можно найти, используя векторное произведение этих векторов.

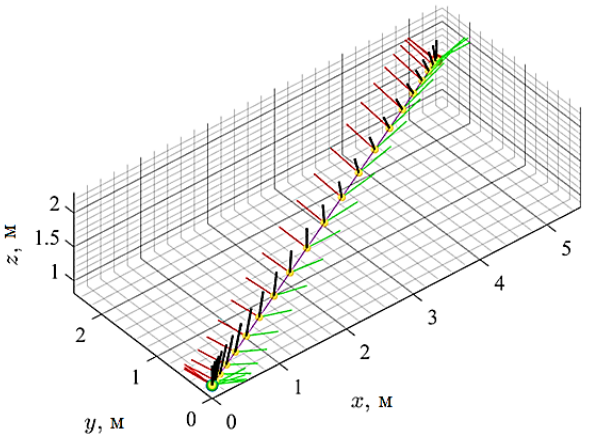
Заметим, что несмотря на то, что последовательность $\mathbf{f}_j$ определяет лишь ориентацию плоскости квадрокоптера, но не самого твердого тела (другими словами, позволяет найти лишь два из трех параметров, которыми задается его ориентация), предложенный алгоритм позволяет построить последовательность матриц направляющих косинусов $\mathbf{T}_j$, которые эту ориентацию определяют однозначно. Это связано с тем, что процедура (14) реализует один из множества возможных поворотов локального базиса $\mathbf{T}_{j-1}$, удовлетворяющих указанному в начале раздела условию, состоящему в том, что векторы $\mathbf{f}_j$ должны быть сонаправлены нормали плоскости квадрокоптера. Существуют другие способы осуществить этот поворот, но все эти способы будут требовать использования больших по величине углов α_j.

В случае, если для работы системы управления ориентацию квадрокоптера необходимо представить через углы Эйлера, кватернионы или другие системы параметризации, их можно

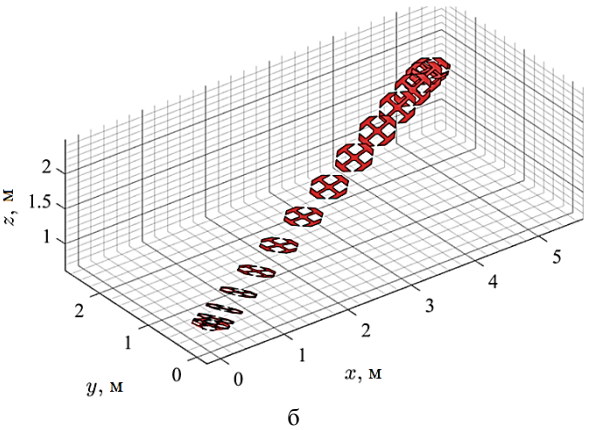
получить из матриц направляющих косинусов путем несложных преобразований, многие из которых реализованы в стандартных математических пакетах [17].

5. Моделирование работы алгоритмов генерации траектории

Рассмотрим задачу перемещения из точки с координатами $\mathbf{r}_C^*(t_0)=[0 \quad 0 \quad 1]^{\mathrm{T}}$ в точку $\mathbf{r}_C^*(t_f)=[5 \quad 2 \quad 2]^{\mathrm{T}}$, что соответствует расстоянию 5.47 м. Скорости робота в крайних точках траектории должны быть нулевыми. На рис. 2,а показана последовательность систем координат, соотносящихся с найденными последовательностями $\mathbf{f}_j$, $\mathbf{T}_j$ и $\mathbf{s}_{C,j}^*$. На рис. 2,б показаны положения квадрокоптера в пространстве в разные моменты времени.



а



б

Рис. 2. а – графическое изображение последовательностей: ▬ – $\mathbf{f}_j$, ▬ – $\mathbf{T}_j$, ▬ – $\mathbf{r}_{C,j}^*$, б – положения квадрокоптера во время полета

На рис.2,а утолщенными линиями показаны приведённые силы $\mathbf{f}_j$, тонкие линии показывают векторы $\hat{x}$ и $\hat{y}$ систем координат, ориентированных согласно матрицам поворота $\mathbf{T}_j$ с центрами в точках $\mathbf{r}_{C,j}^*$.

Можно заметить, что квадрокоптер сначала меняет свою ориентацию для разгона, наклоняя нормаль к плоскости квадрокоптера в направлении конечной точки траектории (цели) и перемещаясь с относительно небольшой скоростью. Затем он ускоряется и начинает менять свою ориентацию, готовясь к торможению. Находясь достаточно близко к цели, квадрокоптер снова изменяет свою ориентацию, принимая горизонтальное положение. Такое поведение квадрокоптера является следствием выбранной формулировки задачи выпуклого программирования (13), и при этом оно является интуитивно понятным.

Задача выпуклого программирования (13) для траектории из 25 точек включает в себя 225 переменных, 156 связей в виде линейных равенств, 24 нелинейные связи в виде неравенств. Для решения этой задачи использовался пакет математического программирования Mosek и программная среда математического программирования YALMIP [18]. Решение данной задачи занимает 0.14 с на персональном компьютере с процессором i7-6700K. При решении подобной задачи на бортовом вычислителе робота это время может существенно возрасти, но даже при десятикратном росте времени вычислений алгоритм сохраняет практическую ценность.

6. Генерация задающих воздействий для системы управления квадрокоптера, реализующего полученную траекторию

Траектория квадрокоптера, получаемая описанным выше методом, задана дискретным множеством точек. На практике многие регуляторы требуют, чтобы задающие воздействия были доступны в любой момент времени или чтобы они обновлялись с заданной частотой. В связи с этим удобно перейти от дискретного множества точек к функциям, задающим желаемое положение и ориентацию квадрокоптера в любой момент времени. Для этого воспользуемся интерполяцией сплайнами.

Последовательность $\mathbf{r}_{C,j}^*$ можно непосредственно использовать для выполнения интерполяции, в результате которой получим функцию времени $\mathbf{r}_C^*(t)$. С другой стороны, последовательность $\mathbf{T}_j$ нельзя непосредственно ин-

терполировать, так как линейная комбинация матриц поворота может не являться матрицей поворота. Для решения этой проблемы заменим матрицы поворота $\mathbf{T}_j$ эквивалентными кватернионами $\mathbf{Q}_j$ (соответствующие формулы приведены в [19]). Для интерполяции последовательностей кватернионов разработаны специальные методы, включая алгоритм Slerp [20], позволяющие использовать последовательность нормированных кватернионов для получения функции, возвращающей нормированный кватернион. Таким образом, получим функцию $\mathbf{Q}(t)$, возвращающую кватернион, определяющий желаемую ориентацию квадрокоптера. Данный кватернион может быть затем преобразован как в матрицу поворота, так и в набор углов Эйлера.

7. Моделирование работы квадрокоптера, движущегося по полученной траектории

Рассмотрим систему управления квадрокоптера, использующую итеративный линейный квадратичный регулятор (ИЛКР). Обычный линейный квадратичный регулятор (ЛКР) подробно описан в литературе по оптимальному управлению и основан на решении алгебраического уравнения Риккати для нахождения матрицы коэффициентов регулятора $\mathbf{K}$. ИЛКР представляет собой модификацию ЛКР, отличающуюся тем, что вычисление матрицы коэффициентов регулятора производится многократно через некоторые промежутки времени. Управляющее воздействие вычисляется следующим образом:

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* - \mathbf{K}(\mathbf{q} - \mathbf{q}^*), \qquad (16)$$

где $\mathbf{q}^* = \mathbf{q}^*(t)$ – значение задающего воздействия желаемого значения вектора обобщенных координат, $\mathbf{u}^*$ – значение задающего воздействия, полученное решением обратной задачи динамики. Подробнее данный регулятор описан в работах [21, 22]. В случае, когда обратная задача динамики не имеет решения, используется её псевдорешение [23].

С учетом физических свойств движителей квадрокоптера дополнительно ограничим вектор $\mathbf{u}$ так, чтобы его компоненты могли принимать лишь положительные значения в некотором диапазоне в соответствии с условием (2).

Проведем моделирование движения квадрокоптера для случая перемещения из точки с координатами $\mathbf{r}_C^*(t_0) = [0 \quad 0 \quad 1]^{\mathrm{T}}$ в точку $\mathbf{r}_C^*(t_f) = [3 \quad 1 \quad 1.5]^{\mathrm{T}}$. На рис. 3 показана желаемая траектория центра масс квадрокоптера, полученная предложенным методом, и реальная траектория квадрокоптера, полученная в ходе математического моделирования.

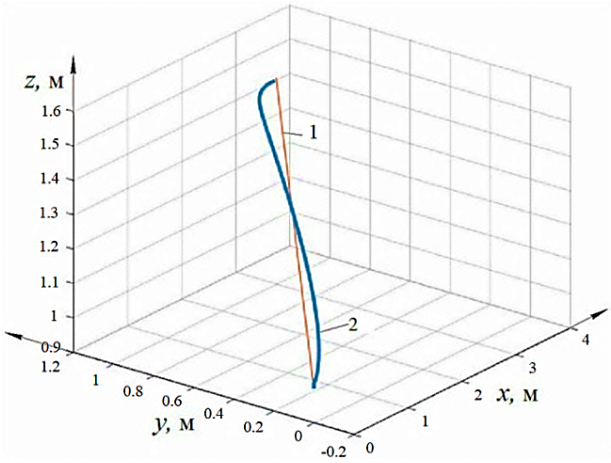


Рис. 3. Реальная и желаемая траектории центра масс квадрокоптера: 1 – реальная траектория, 2 – желаемая траектория

На рис. 4 показана желаемая траектория и последовательность положений квадрокоптера.

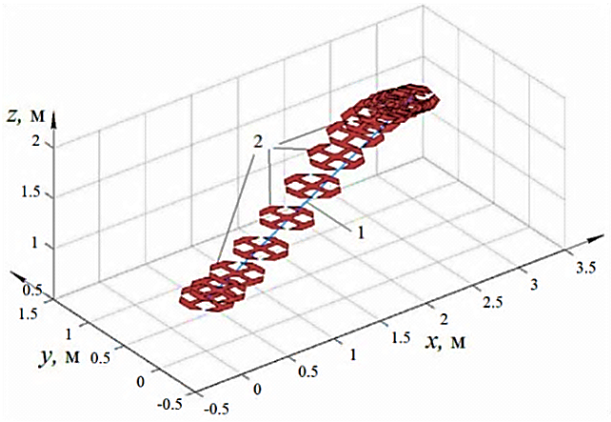


Рис. 4. Желаемая траектория центра масс квадрокоптера и последовательность его положений: 1 – желаемая траектория, 2 – положения квадрокоптера

Заметим, что в процессе движения квадрокоптер отклоняется от заданной траектории, при этом начальные и конечные точки желаемой и реальной траекторий совпадают.

Для того чтобы оценить временное отставание квадрокоптера от заданной траектории, рассмотрим временные зависимости обобщенных координат (рис. 5).

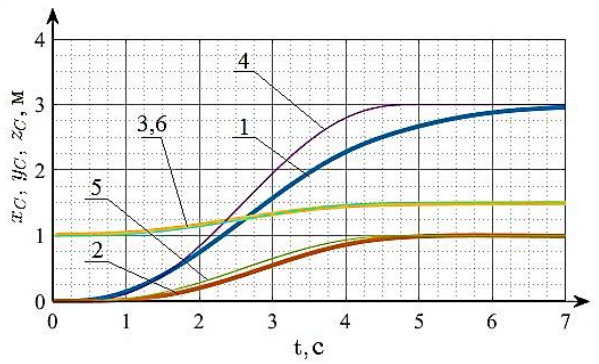


Рис. 5. Временные зависимости обобщенных координат и их желаемые значения; 1 – $x_C(t)$, 2 – $y_C(t)$, 3 – $z_C(t)$, 4 – $x_C^*(t)$, 5 – $y_C^*(t)$, 6 – $z_C^*(t)$

Графики, показанные на рис. 5, позволяют сделать вывод, что квадрокоптер выполняет заданную траекторию с существенным отставанием по времени. Так, достижение заданной координаты вдоль оси *Oy* было выполнено с отставанием в 2.5 с. По остальным координатам отставание по времени значительно ниже.

Рассмотрим, какое влияние ошибка по положению центра масс квадрокоптера в начальный момент времени оказывает на положение центра масс в конце траектории. Обозначим ошибку по положению в начальный момент времени как $\mathbf{e}_0$ и ошибку по положению в конечный момент времени как $\mathbf{e}_f$. Обозначим модуль $\mathbf{e}_0$ как $\delta = \|\mathbf{e}_0\|$ и модуль $\mathbf{e}_f$ как $\varepsilon = \|\mathbf{e}_f\|$.

Проведем 500 экспериментов со случайно выбранными $\mathbf{e}_0$. На рис. 6 для каждого эксперимента указана точка с координатами δ и ε, полученными для этого эксперимента.

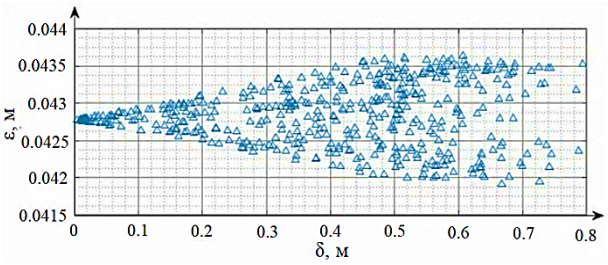


Рис. 6. Распределение значений δ и ε для проведённых экспериментов

Можем заметить, что разброс значений ε растет с ростом δ, при этом остается в диапазоне 2 мм. При ошибке по положению в начальный момент времени в пределах 0.1 м ошибка по положению в конечный момент времени варьируется в диапазоне размером 0.5 мм. Абсолютное значение ошибки по положению в конечный момент времени не превышает 44 мм для всех экспериментов.

На рис. 7 показано распределение $\mathbf{e}_0$, использованное для экспериментов, а на рис. 8 показано полученное распределение $\mathbf{e}_f$.

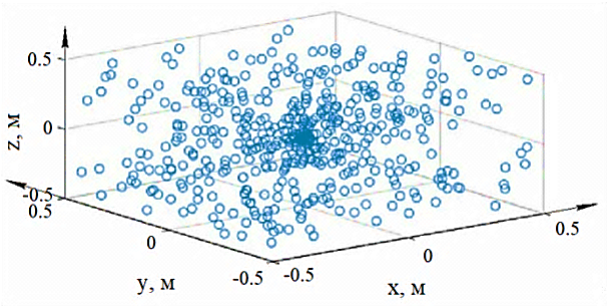


Рис. 7. Заданное распределение ошибок $\mathbf{e}_0$

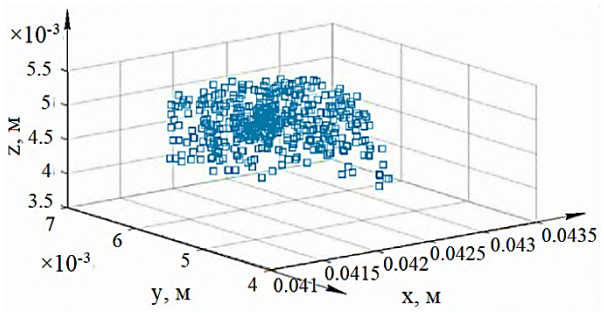


Рис. 8. Полученное распределение ошибок $\mathbf{e}_f$

Полученное распределение ошибок $\mathbf{e}_f$, показанное на рис. 8, помещается в кубе 2.5x3x2 мм при том, что распределение $\mathbf{e}_0$ помещается в кубе со сторонами 1 м, т.е. объем куба, содержащего ошибки $\mathbf{e}_f$, в $6.6 \cdot 10^7$ раз меньше, чем объем куба, содержащего ошибки $\mathbf{e}_0$.

Эти результаты указывают, что предложенный метод позволяет получать траектории движения квадрокоптера, которые тот может выполнить. Быстрое уменьшение разброса ε при снижении δ указывает на устойчивость системы управления при движении вдоль полученной траектории.

Заключение

В этой работе был предложен метод генерации траекторий для квадрокоптера, основан-

ный на выпуклом программировании, а также алгебраических подходах к определению последовательности ориентаций квадрокоптера. Предложенный метод использует решение одной задачи выпуклого программирования для получения последовательности положений центра масс квадрокоптера и векторов сил, которые должны быть приложены к квадрокоптеру, чтобы переместить его из текущего положения в следующее. Информация об ориентации этих векторов используется для определения ориентации квадрокоптера при известной начальной ориентации. Данная дискретная последовательность положений и ориентаций, в свою очередь, используется для построения интерполяции.

Проведенное математическое моделирование показало, что предложенный метод позволяет получать траектории, которые квадрокоптер может отрабатывать, демонстрируя устойчивость по отношению к ошибкам начального положения робота. Эти исследования проводились для квадрокоптера, использующего итеративный линейный квадратичный регулятор. Моделирование движения квадрокоптера вдоль полученных траекторий для случая, когда для управления роботом используются специализированные регуляторы, разработанные для квадрокоптеров, представляет отдельный интерес и будет проделано в дальнейшем.

Заметим, что предложенный метод может быть легко расширен для включения информации о препятствиях, используя подход, основанный на разбиении пространства на свободные от препятствий выпуклые области и введении соответствующих ограничений в задачи выпуклого программирования (13). Метод разбиения пространства на свободные от препятствий выпуклые области описан в работе [24].

Литература

1. A survey of modelling and identification of quadrotor robot / X. Zhang, X. Li, K. Wang, Y. Lu // Abstract and Applied Analysis. 2014. Vol. 2014. 16 p.

2. Generic unmanned aerial vehicle (UAV) for civilian application-A feasibility assessment and market survey on civilian application for aerial imaging / J.T.K. Ping, A.E. Ling, T.J. Quan, C.Y. Dat // Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT), 2012 IEEE Conference on, Kuala Lumpur, Malaysia. 2012. P. 289-294.

3. Gupte S., Mohandas P.I.T., Conrad J.M. A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles // Southeastcon, 2012 Proceedings of IEEE, Orlando, FL, USA. 2012. P. 1-6.

4. Kumar V., Michael N. Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles // The International Journal of Robotics Research 2012. Vol. 31(11). P.1279-1291.

5. Das A., Subbarao K., Lewis F. Dynamic inversion with zero-dynamics stabilisation for quadrotor control // IET Control Theory & Applications. 2009. Vol. 3(3). P. 303-314.

6. Bouabdallah S., Noth A., Siegwart R. PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor // Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings 2004 IEEE/RSJ International Conference on. Sendai, Japan. 2004. Vol. 3. P. 2451-2456.

7. Alexis K., Nikolakopoulos G., Tzes, A. Model predictive quadrotor control: attitude, altitude and position experimental studies // IET Control Theory & Applications. 2012. Vol. 6(12). P. 1812-1827.

8. Lee D., Jin Kim H., Sastry S. Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter // International Journal of Control, Automation and Systems. 2009. Vol. 7(3). P. 419-428.

9. A Kinect-based natural interface for quadrotor control / A. Sanna, F. Lamberti, G. Paravati, F. Manuri // Entertainment Computing. 2013. Vol. 4(3). P. 179-186.

10. Kim B.H., Kim M., Jo S. Quadcopter flight control using a low-cost hybrid interface with EEG-based classification and eye tracking // Computers in Biology and Medicine. 2014. Vol. 51. P. 82-92.

11. Hehn M., D'Andrea R. Quadrocopter trajectory generation and control // IFAC Proceedings Volumes. 2011. Vol. 44(1). P. 1485-1491.

12. Mellinger D., Kumar V. Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors // Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on, Shanghai, China. 2011. P. 2520-2525.

13. Bresciani T. Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter. MScTheses. 2008. 184 p.

14. Naidoo Y., Stopforth R., Bright G. Quad-rotor unmanned aerial vehicle helicopter modelling & control // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2011. Vol. 8(4). P. 45.

15. Featherstone R. Rigid body dynamics algorithms. Springer, 2014. 271 p.

16. Boyd S., Vandenberghe L. Convex optimization. Cambridge university press. 2004. 725 p.

17. Shoemake K. Euler angle conversion. Graphics gems IV. 1994. P. 222-229.

18. Lofberg J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB // Computer Aided Control Systems Design, 2004 IEEE International Symposium on. New Orleans, LA, USA. 2004. P. 284-289.

19. Diebel J. Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors // Matrix. 2006. Vol. 58 (15-16). P. 1-35.

20. Shoemake K. Animating rotation with quaternion curves // ACM SIGGRAPH, Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, New York, NY, USA . 1985. Vol. 19(3). P. 245-254.

21. Jatsun S., Savin S., Yatsun A., Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation // International Workshop on Medical and Service Robots MESROB 2016: New Trends in Medical and Service Robots, Graz, Austria. 2016. P. 305-317.

22. Li W., Todorov E. Iterative linear quadratic regulator design for nonlinear biological movement systems // Proceedings of 1st International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Setubal, Portugal. 2004. P. 222-229.

23. Леонов А.С. Решение некорректно поставленных обратных задач: очерк теории, практические алгоритмы и

демонстрации в МАТЛАБ. М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2010. 336 с.

24. Savin S. An Algorithm for Generating Convex Obstacle-free Regions Based on Stereographic Projection // Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference on, Astana, Kazakhstan. 2017.

Поступила 11.05.2018; принята к публикации 14.09.2018

Сведения об авторах

Савин Сергей Игоревич - канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет (305040 г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: sergey89mtkgtu@mail.ru
Ворочаева Людмила Юрьевна - канд. техн. наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники, Юго-Западный государственный университет (305040 г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: mila180888@yandex.ru
Савин Александр Игоревич – инженер, АО «Авиаавтоматика» им. В.В. Тарасова (305040, г. Курск, ул. Запольная, 47), e-mail: alexander_sash90@mail.ru

OPTIMAL TRAJECTORY GENERATION FOR A QUADROTOR USING CONVEX PROGRAMMING

S.I. Savin[1], L.Yu. Vorochaeva[1], A.I. Savin[2]

[1]Southwest State University, Kursk, Russia
[2]Joint-Stock Company "Aviaavtomatika" n.a. V.V. Tarasov, Kursk, Russia

Abstract: in this paper the problem of controlling a quadrotor is considered. A method for generating trajectories for a quadrotor is described; the method is based on the use of numerical optimization methods and algebraic approaches for determining the sequence of robot orientations. It is shown that the problem of generating trajectories can be represented as a convex programming problem. The solution of the problem of convex programming in this case is used to form a sequence of positions of the center of mass of the device and to find the force vectors that must be applied to the quadrotor to move it from the current position to the next, taking into account the dynamics of the aircraft. The information on the orientations of the force vectors applied to the quadrotor can be used to determine the sequence of the robot's orientations. A method for calculating these orientations is proposed, the necessary assumptions are described. To obtain the control inputs for the feedback control system, interpolation of the data obtained by solving the optimization problem for a discrete set of robot positions is used. The tracking control system is implemented using an iterative linear quadratic regulator. The results of mathematical modeling indicate that the quadrotor is able to execute the trajectories obtained by the described method and is stable in relation to the errors of its initial position

Key words: quadrotor, trajectory generation method, convex programming, stability, center of mass trajectory

References

1. Zhang X., Li X., Wang K., Lu Y. "A survey of modelling and identification of quadrotor robot", *Abstract and Applied Analysis*, 2014, vol. 2014, 16 p.

2. Ping J.T.K., Ling A.E., Quan T.J., Dat C.Y. "Generic unmanned aerial vehicle (UAV) for civilian application-A feasibility assessment and market survey on civilian application for aerial imaging", *Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology (STUDENT), 2012 IEEE Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2012, pp. 289-294.

3. Gupte S., Mohandas P.I.T., Conrad J.M. "A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles", Southeastcon, *2012 Proceedings of IEEE*, Orlando, FL, USA, 2012, pp. 1-6.

4. Kumar V., Michael N. "Opportunities and challenges with autonomous micro aerial vehicles", *The International Journal of Robotics Research*, 2012, vol. 31(11), pp.1279-1291.

5. Das A., Subbarao K., Lewis F. "Dynamic inversion with zero-dynamics stabilization for quadrotor control", *IET Control Theory & Applications*, 2009, vol. 3(3), pp. 303-314.

6. Bouabdallah S., Noth A., Siegwart R. "PID vs LQ control techniques applied to an indoor micro quadrotor", *Intelligent Robots and Systems 2004 (IROS 2004), Proceedings 2004 IEEE/RSJ International Conference,* Sendai, Japan, 2004, vol. 3, pp. 2451-2456.

7. Alexis K., Nikolakopoulos G., Tzes, A. "Model predictive quadrotor control: attitude, altitude and position experimental studies", *IET Control Theory & Applications*, 2012, vol. 6(12), pp. 1812-1827.

8. Lee D., Jin Kim H., Sastry S. "Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter", *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2009, vol. 7(3), pp. 419-428.

9. Sanna A., Lamberti F., Paravati G., Manuri F. "A Kinect-based natural interface for quadrotor control", *Entertainment Computing*, 2013, vol. 4(3), pp. 179-186.

10. Kim B.H., Kim M., Jo S. "Quadcopter flight control using a low-cost hybrid interface with EEG-based classification and eye tracking", *Computers in Biology and Medicine*, 2014, vol. 51, pp. 82-92.

11. Hehn M., D'Andrea R. “Quadrocopter trajectory generation and control”, *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, vol. 44(1), pp. 1485-1491.

12. Mellinger D., Kumar V. “Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors”, *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference*, Shanghai, China, 2011, pp. 2520-2525.

13. Bresciani T. “Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter”, MScTheses, 2008, 184 p.

14. Naidoo Y., Stopforth R., Bright G. “Quad-rotor unmanned aerial vehicle helicopter modelling & control”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2011, vol. 8(4), pp. 45.

15. Featherstone R. “Rigid body dynamics algorithms”, Springer, 2014, 271 p.

16. Boyd S., Vandenberghe L. “Convex optimization”, Cambridge university press, 2004, 725 p.

17. Shoemake K. “Euler angle conversion”, *Graphics gems IV*, 1994, pp. 222-229.

18. Lofberg J. “YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB”, *Computer Aided Control Systems Design, 2004 IEEE International Symposium*, New Orleans, LA, USA, 2004, pp. 284-289.

19. Diebel J. “Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors”, *Matrix*, 2006, vol. 58 (15-16), pp. 1-35.

20. Shoemake K. “Animating rotation with quaternion curves”, ACM SIGGRAPH, *Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, USA, 1985, vol. 19(3), pp. 245-254.

21. Jatsun S., Savin S., Yatsun A. “Motion Control Algorithm for a Lower Limb Exoskeleton Based on Iterative LQR and ZMP method for trajectory generation”, *International Workshop on Medical and Service Robots MESROB 2016: New Trends in Medical and Service Robots*, Graz, Austria, 2016, pp. 305-317.

22. Li W., Todorov E. “Iterative linear quadratic regulator design for nonlinear biological movement systems”, *Proceedings of 1st International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Setubal, Portugal, 2004, pp. 222-229.

23. Leonov A.S. “The solution of incorrectly posed inverse problems: theory essay, practical algorithms and demonstrations in MATLAB” (“Reshenie nekorrektno postavlennykh obratnykh zadach: ocherk teorii, prakticheskiye algoritmy i demonstratsii v MATLAB”), Moscow, Knizhnyy dom LIBRO-KOM, 2010, 336 p.

24. Savin S. “An algorithm for generating convex obstacle-free regions based on stereographic projection”, *Control and Communications (SIBCON), 2017 International Siberian Conference*, Astana, Kazakhstan, 2017.

Submitted 11.05.2018; revised 14.09.2018

Information about the authors

Sergey I. Savin, Cand. Sc. (Technical), Senior Researcher, South-West State University (94 50-let Oktyabrya st., Kursk 305040, Russia), e-mail: sergey89mkgtu@mail.ru.

Lyudmila Yu. Vorochaeva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, South-West State University, (94 50-let Oktyabrya st., Kursk 305040, Russia), e-mail: mila180888@yandex.ru.

Alexander I. Savin, Engineer, JS company "Aviaavtomatika" n.a. V.V. Tarasov (47 Zapol’naya st., Kursk 305040, Russia), e-mail: alexander_sash90@mail.ru.

Энергетика

УДК 621.311.001.57

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛНЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Ю.Д. Бай, А.В. Шмойлов, М.В. Андреев, А.А. Суворов, А.В. Киевец, И.А. Разживин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Аннотация: в рассматриваемых в электроэнергетике задачах интересующие параметры стационарных режимов, электрические величины при повреждениях, показатели функциональной надежности, резервов мощности электростанций, сечений проводов линий сетей, мощностей трансформаторных и преобразовательных подстанций и др. являются функциональными зависимостями исходных данных, например активных и реактивных мощностей, величин и углов напряжений узлов электрических сетей или случайных аргументов. Нахождение полных вероятностных характеристик – плотностей распределения вероятностей (ПРВ) и функций распределения вероятностей (ФРВ) этих функциональных зависимостей позволяет получить полное представление о всех возможных значениях, которые могут принимать интересующие параметры. Основная проблема заключается в том, что получение ФРВ и ПРВ интересующего параметра стандартными статистическими методами на данный момент не имеет практического решения. В связи с этим предлагается рассматриваемый в статье разрабатываемый метод селекции границ входных и выходных данных (СГИД), не критично зависимый от размерности функциональной зависимости (ФЗ). Приведены актуальные методы статистического моделирования случайных аргументов, рассмотрен метод селекции входных и выходных границ данных с аналитической точки зрения, также представлен усовершенствованный алгоритм получения полных вероятностных характеристик функциональных зависимостей, продемонстрированы результаты маломерных примеров

Ключевые слова: электроэнергетические системы, численные методы, закон распределения вероятности, случайная величина, квантиль, функциональная зависимость

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, грант № 14.Y30.18.2379-МК

Введение

Получение функции и плотности распределения вероятностей (ФРВ и ПРВ) многомерной функциональной зависимости (ФЗ), также вероятностей принятия значений из многомерной области в каноническом аналитическом варианте представляет собой в каждом случае функционал от многомерной совместной ПРВ случайных аргументов (СА) или совместных вероятностей этих аргументов в пределах, определяемых как видом интересующего функционала, так и сутью интересующей отраслевой задачи, моделируемой функциональной зависимостью [2, 11, 12]. Случайные аргументы (СА) функциональной зависимости с точки зрения целей отраслевых задач, по логике вещей, являются независимыми. При необходимости рассматривать зависимость между СА принципиально возможно, но менее продуктивно, т.к. существенно усложняет реализацию многомерных совместных систем ПРВ, и в то же самое время не дает никакого положительного результата. При вычислении совместных ПРВ в данных условиях кроме одномерных ПРВ потребуются дополнительно многочисленные условные, что приведет к практически неразрешимым трудностям в получении этих выражений и значений [3].

Современные численные методы нахождения ФРВ и ПРВ

Пределы компонентов функционалов раскрываются путем анализа границ области случайных аргументов, обусловленной постановкой задачи и видом ФЗ, с самых простых и определенных пределов внешнего интеграла или суммы функционала по одному из выбранных СА. Продолжая углубляться во внутренние компоненты функционала, необходимо находить выражения более сложных, многомерных зависимостей пределов от случайных аргументов. Эти процедуры по сложности практически также аналитически невыполнимы и поэтому заменяются

© Бай Ю.Д., Шмойлов А.В., Андреев М.В., Суворов А.А., Киевец А.В., Разживин И.А., 2018

конкретным анализом в целом неравенств ФЗ, определяющих получение ФРВ, ПРВ или вероятности принятия значения из многомерного интервала ФЗ, который благодаря жесткой связи с СА преобразуется в соответствующие неравенства каждого конкретного СА. В результате такого поэлементно-обобщенного анализа формируется знание о принадлежности или непринадлежности значения ФЗ области ФЗ и соответствующему ей функционала при каждом конкретном варианте значений СА. Это дает возможность статистически оценить значение вероятностного функционала (обычно ФРВ), не вычисляя самих значений последнего при разных вариантах СА, т.е. путем отношения числа m значений ФЗ, попадающих в область ФЗ, определяемую неравенством функционала, к общему числу n попаданий и непопаданий в данную область [5].

При определении ФРВ функциональной зависимости для смоделированных вариантов значений СА вычисляются значения ФЗ и сравниваются с заданным значением ФЗ. Если вычисленное значение ФЗ меньше ее заданного значения, то это означает статистический случай попадания функционала ФРВ в область ФЗ и поэтому добавляется единица как к числу m, так и к числу n, в противном случае единица добавляется только к числу n. Благодаря проведенному статистическому моделированию вариантов СА вычисление каждого значения функционала ФРВ многомерной ФЗ сводится к подсчету чисел попаданий m и непопаданий $n - m$ в область ФЗ и отношения m / n. Последнее отношение является ничем иным как статистической оценкой функционала ФРВ функциональной зависимости [5].

Есть практическая проблема необозримой массовости вычислений каждого значения искомой ФРВ, которая, с одной стороны, статистически не ограничена, а с другой стороны, лавинообразно нарастает с увеличением размерности ФЗ. В электроэнергетике это многомерные задачи определения ЗРВ показателей функциональной надежности, параметров установившихся режимов, электрических величин при повреждениях, ресурсной, технической, экономической эффективности и др. Также имеется большой перечень задач, определяемых ФЗ со средним и малым числом СА (в пределах десятка [9, 10, 13] – это исследовательские задачи выпускных работ магистрантов и аспирантов, исследовательские задачи заказных работ) и все случаи нуждаются в решении одного общего алгоритма нахождения законов распределения вероятностей (ЗРВ) в виде ПРВ ФЗ по заданным ЗРВ случайных аргументов (СА). Однако трудности аналитического формирования верхних и нижних пределов и последующего вычисления функционалов возникают с 3-й – 4-й размерности ФЗ, а статистическая неопределенность бесконечного континуума вариантов СА для статистических испытаний принципиально не позволяют дать абсолютную гарантию точности искомому ЗРВ. Поэтому используется и развивается известная система доверительных вероятностей и доверительных интервалов, которая дает практическую возможность с заданной гарантией ограничить количество вариантов значений СА или статистических испытаний. Но данное прагматическое решение проблемы производится за счет снижения точности, поэтому не может ограничить целесообразность и необходимость поиска других методов, которые позволяют добиться большей точности расчетного определения ЗРВ функциональной зависимости при сохранении или увеличении гарантии этой точности.

Логика первого метода заключается в получении «машинной» статистики ФЗ, его в дальнейшем целесообразно называть методом СМСИ. Примером данного метода является описанный выше метод определения значений ФРВ функциональной зависимости без вычисления самого функционала [10]. Другая более простая модификации этого метода представляет собой вычисление значений ФЗ для каждого статистически смоделированного варианта СА, который используется только для получения статистики ФЗ, т.е. вообще не выставляются требования формирования и вычисления функционалов, а получаемая статистика используется по прямому назначению для получения статистических оценок интересующих вероятностных характеристик. При этом ограничение статистической бесконечности вариантов, как и в случае определения ФРВ функциональной зависимости, разрешается с помощью аппарата доверительных вероятностей и доверительных интервалов [8]. Следующая модификация метода основана на разложении функциональной зависимости относительно

математических ожиданий (МО) СА ФЗ. После применяют операторы МО и дисперсии других моментов более высокого порядка, что дает приближенное определение моментов разных порядков ФЗ. Этот метод кратко можно описать методом степенного разложения относительно математического ожидания (СРМО) [8].

Для сохранения статистической представительности получаемых результатов многомерных ФЗ возрастает количество требуемых испытательных значений статистических оценок ФЗ, что ограничивает применение методов СМСИ и СРМО в случае ФЗ многих СА. Исходя из этого, актуальным является поиск иных расчетных численных методов определения ЗРВ, не критично зависящих от размерности функциональной зависимости.

Анализ разрабатываемого метода СГИД

В ходе проводимых работ был предложен метод селекции границ входных и выходных данных СГИД [1, 4], не критичный к размерности функциональной зависимости. В основе метода лежит утверждение, что при выборе всех СА равновероятными результирующее значение функциональной зависимости будет иметь ту же вероятность, что и аргументы. Однако возможны одинаковые вероятности как у ФЗ, так и у СА. Приведенный в [4, 7, 8] алгоритм реализации метода селекции границ входных и выходных данных на основе определенных ПРВ и ФРВ случайных аргументов искомой ФРВ функциональной зависимости от ЗРВ случайных аргументов обеспечивает, в первую очередь, однозначность вероятностей значений СА и ФЗ, которая гарантирована за счет привязки значений СА и ФЗ к собственным неубывающим ФРВ, а во вторую, равенство вероятностей принятия значений из интервалов, пристыкованных к равновероятным (по равенству ФРВ) значениям каждого СА и неизвестной ФРВ функциональной зависимости.

Несмотря на в целом правильную и четкую логику метода относительно работы с одинаковыми вероятностями значений случайных аргументов и ФЗ, варианты обеспечения равенства с помощью совместного применения собственных ФРВ и ПРВ каждого СА и ФЗ [2] как достаточного, не устраняют потери ряда фундаментальных свойств алгоритма канонического аналитического преобразования многомерных функционалов по определению ЗРВ многомерных ФЗ, в том числе моделирующих интересующие задачи электроэнергетики. Об этом свидетельствует проверка метода СГИД [2] путем сравнения кривых ФРВ, найденной в первом случае в виде функционала, т.е. истинной кривой, и полученной кривой по предлагаемому методу СГИД. Можно заметить, что для аддитивных (параметры режимов и электрические величины при повреждениях) и мультипликативных ФЗ несовпадения кривых истинных и по методу СГИД ФРВ существенно различаются, причем в случае аддитивных ФЗ по мере нарастания количества слагаемых расхождение увеличивается в диапазоне первой половины значений ФЗ [8]. Отличия обусловлены тем, что предписываемые методом СГИД соотношения вероятностей на интервалах ФЗ определяются одномерными ФРВ и ПРВ случайных аргументов, которые никак не учитывают многомерность совместных вероятностных характеристик СА. Это обусловливает конфигурацию ФРВ функциональной зависимости такой же или близкой к ФРВ того или другого случайного аргумента, который используется для определения вида и параметров ФРВ функциональной зависимости. На самом деле вероятностные характеристики всех СА через их совместные ФРВ и ПРВ обеспечивают формирование истинных полных вероятностных характеристик ФЗ, что естественным путем выполняется при аналитическом вычислении функционалов.

Расчеты и анализ ПРВ мультипликативных и аддитивных ФЗ малой размерности [1, 8] от СА намечают курс отличий ФРВ по методу СГИД от реальных. Как правило, исследуемые ФЗ энергетических задач являются либо слабо нелинейными (в случае рабочих режимов в виде мощностей), или практически линейными (электрические величины при повреждениях) аддитивными ФЗ. Данные особенности можно заметить у ФРВ аддитивных ФЗ по методу СГИД [1, 8], что можно использовать для коррекции ФРВ параметров стационарных режимов и электрических величин в сверхпереходный момент при повреждениях. Количественная мера данной коррекции определяется на основании полученных расчетных исследований ФРВ по методу СГИД

и методу степенного разложения относительно математического ожидания на маломерных ФЗ, для которых имеет место аналитическое определение интересующих функционалов.

Отмеченные недостатки метода СГИД выявили невозможность его применения для аддитивных ФЗ со слагаемыми (СА) с сильно различающимися формами ЗРВ на протяжении диапазонов слагаемых. Так, алгебраическая сумма ФЗ небаланса активной мощности на сборных шинах электростанции состоит из нагрузки и располагаемой мощности, ФРВ которых при больших значениях слагаемых резко различаются. Кривая ФРВ нагрузки близка к нормальному ЗРВ на диапазоне от минимального до максимального значения, т.е. S-образная кривая с асимптотическим приближением к нулю при малых значениях и к единице при больших значениях. Кривая ФРВ располагаемой мощности на своем диапазоне представляет собой ускоренно-нарастающую зависимость от нуля до единицы. При больших значениях мощности нагрузки и располагаемой мощности имеет место существенное расхождение кривых ФРВ. Это приводит к инверсии ФРВ небаланса (большее значение ФРВ соответствует меньшему значению небаланса), что является нарушением свойства неубывания ФРВ.

Логика функционалов по вычислению ФРВ и ПРВ обеспечивает автоматический учет при суммировании вероятностей совмещений разных вариантов значений всех случайных аргументов ФЗ, избираемых из всей области их пространства с помощью системы пределов компонентов каждого функционала. Этот выбор зависит от свойств ПРВ и ФРВ случайных аргументов и ФЗ, также ограничений области существования ФЗ, определяемых характером прикладной задачи.

В случае независимых СА вероятности их совмещения образуются как произведение вероятностей значений СА в форме одномерных ПРВ или приращений ФРВ, которые должны быть известны, и чаще всего могут быть в виде нормальных или равномерных ЗРВ. В рамках практических задач электроэнергетики в качестве СА ФЗ принимаются независимые переменные или случайные величины. В противном случае пропадает практический, эксплуатационный и продуктивный смысл ФЗ, который компактно и комфортно формулирует каждую интересующую отраслевую задачу. Независимость аргументов предопределяет вероятности совмещения значений случайных аргументов как произведений безусловных вероятностей, которые находятся в форме произведения одномерных ПРВ и ФРВ СА. Таким образом, вероятности совместных значений ПРВ и ФРВ системы СА являются значениями совместных ПРВ и ФРВ и, следовательно, интегрируемыми значениями функционалов для формирования одномерной ПРВ или ФРВ многомерных ФЗ [7]. К сожалению, метод СГИД игнорировал данную систему совместных и одномерных ПРВ и ФРВ случайных аргументов и вероятностное взаимодействие между ними, а оставлял только необходимое свойство равенства вероятностей СА и ФЗ. Тем не менее, опыт равновероятности метода СГИД не пропадает, но усложняется через множество составляющих совместных ФРВ и ПРВ случайных аргументов. Эти составляющие должны быть выбраны из названного множества с помощью некоторой процедуры.

Общая концепция метода СГИД

Неуправляемый выбор метода СМСИ прост, нагляден, однако требует бесконечного ресурса и даже статистическое ограничение результатов метода СМСИ в системе доверительных интервалов и доверительных вероятностей в задачах, моделируемых многомерными ФЗ, с ростом многомерности все в меньшей и меньшей степени ограничивает фактическое количество статистических испытаний. Поэтому требуется другой принцип, который обеспечил бы радикальное ограничение количества вариантов значений СА и достаточную представительность результатов.

Такой принцип может быть предложен. Сущность этого принципа состоит в дискретизации СА и ФЗ. Это обеспечит конечность дискретного континуума за счет неполного (дискретного) воспроизведения каждого СА, а также и ФЗ. Благодаря дискретизации интересующие функционалы ФРВ, ПРВ, вероятности принятия значения из диапазона ФЗ содержат количественно ограниченные континуумы совмещений значений СА, их совместных вероятностей и других (совместных ФРВ и ПРВ) вероятностных характеристик. Сокращение происходит до числа совмещений в рамках

одной конечной дискретной генеральной совокупности СА. Из этой совокупности необходимо выбрать вероятностные характеристики интересующих совмещений СА, формирующих одинаковые значения ФЗ, и объединить значения названных вероятностных характеристик для каждого случая совмещения СА с одинаковым значением ФЗ. Однако анализ совместных ФРВ и ПРВ показал, что если составляющие совместной ПРВ по своей природе несовместны, то составляющие совместной ФРВ, наоборот, совместны. Использование несовместных составляющих совместной ПРВ для формирования значений ПРВ функциональной зависимости просто и наглядно – это обычное суммирование в соответствии с правилом вероятности суммы несовместных событий. Причем, как указано выше, суммируемые составляющие должны характеризоваться одним и тем же значением ФЗ и они должны быть просуммированы для каждого значения ФЗ, что обеспечит, по крайней мере, вид дискретного спектра ПРВ функциональной зависимости. Тогда как процедурам выбора, обращения и управления составляющих совместной ФРВ случайных аргументов с целью формирования ФРВ функциональной зависимости должны предшествовать дополнительные вычислительные операции по устранению совместности составляющих совместной ФРВ и только после этого возможно суммирование этих составляющих как характеризующих несовместные объекты. Поэтому для простоты в дальнейшем рассматривается только формирование ПРВ функциональной зависимости, а затем путем интегрирования (суммирования) последней определяется ФРВ функциональной зависимости. Вероятности принятия значений многомерной ФЗ целесообразно находить не через выбор значений совместной ПРВ, а более просто через уже полученную одномерную ФРВ функциональной зависимости.

Таким образом, заданные значения СА и относящиеся к ним значения вероятностных характеристик (ПРВ) при перемножении ПРВ случайных аргументов обеспечивают совместную многомерную ПРВ, из которой формируются значения ПРВ функциональной зависимости. Это формирование осуществляется путем выбора и суммирования значений совместной многомерной ПРВ случайных аргументов по критерию одинаковых значений многомерной ФЗ, т.е. всех значений СА, подставленных в выражение ФЗ, при которых ФЗ имеет одно и то же значение. Данные операции выполняются для каждого значения ФЗ.

Дискретизация СА с целью создания ограниченной генеральной совокупности для формирования дискретных значений совместной ПРВ случайных аргументов и ПРВ функциональной зависимости может быть выполнена по разным вариантам. Важно при этом обеспечить автоматическое формирование дискретных значений многочисленных СА в многомерных энергетических задачах, а следовательно, и описывающих ФЗ. Поэтому дискретизацию значений СА предлагается производить не произвольным, а управляемым путем, т.е. через так называемые квантили заданных порядков или заданных значений ФРВ, аргументы которых являются квантилями заданных порядков. Это означает, что дискретизация СА, а через СА и ФЗ, производится с помощью одного и того же вероятностного диапазона [0,1], значения которого в виде значений ФРВ случайных аргументов являются значениями порядков квантилей каждого СА. Процесс формирования дискретных значений СА таким образом может осуществляться программно, на компьютерах. Получающиеся при этом квантили соседних порядков и интервалы между этими квантилями для разных СА являются различными и зависят от вида ЗРВ и диапазона каждого СА. Дискретные значения ФЗ при этом образуются путем подстановки в выражение ФЗ квантилей всех СА, среди которых будут квантили всех СА одного порядка. Последние, как показывает анализ, образуют дискретную линейку всех значений ФЗ или дискретную шкалу ФЗ во всем ее диапазоне. Эти дискретные значения ФЗ и соответствующие им квантили СА в дальнейшем называются базовыми. Имеют место также образуемые при подстановке в выражение ФЗ всех квантилей СА разных порядков, но обеспечивающих те же самые базовые значения ФЗ. Есть и такие варианты квантилей всех СА, при подстановке которых в выражение ФЗ последнее отличается от базовых значений ФЗ. Предлагаемый способ дискретизации не зависит от порядков квантилей, равномерности или неравномерности интервалов между этими квантилями. Вычисленное значение ФЗ таким путем является квантилем, однако неизвестного порядка.

Произведение порядков квантилей или ФРВ всех СА является порядком квантиля, но не одномерной ФРВ функциональной зависимости, а многомерной совместной ФРВ всех СА, который сам по себе практического интереса не представляет. Анализ показывает, что интерес представляет сумма произведений одномерных, но не ФРВ, а ПРВ всех СА, которые составляют совместную ПРВ независимых случайных аргументов. Интерес состоит в том, что значения совместной ПРВ характеризуют несовместные компоненты (многомерные значения или векторы всех СА), среди которых имеют место и составляющие, характеризуемые искомой ПРВ функциональной зависимости. Те несовместные составляющие (компоненты или совмещения всех СА), которые, будучи подставленными в выражение ФЗ, дают одинаковые значения ФЗ, в логической сумме формируют полное значение ФЗ. Поскольку составляющие полного значения ФЗ (совмещения всех СА для совместной ПРВ) несовместны, вероятности или значения совместной ПРВ по критерию одинакового значения ФЗ можно просто сложить по разным критериям, в том числе по критерию одного и того же значения ФЗ. Последняя сумма по критерию одного и того же значения ФЗ будет ничем иным, как одним из значений, пропорциональным ПРВ функциональной зависимости. В этой сумме будут участвовать все совместные ПРВ, которые сформировались при заданном варианте дискретизации СА и удовлетворяют требованию одного и того же дискретного значения или квантиля ФЗ пока неизвестного порядка. Аналогично путем суммирования совместных ПРВ всех СА, удовлетворяющих требованию неизменного другого дискретного значения или квантиля ФЗ, другого также неизвестного порядка, можно получить другое пропорциональное значение ПРВ функциональной зависимости или квантиля ФЗ другого неизвестного порядка. Так можно получить пропорциональные значения искомой ПРВ для всех дискретных пропорциональных значений или квантилей ФЗ всех неизвестных порядков ФЗ. Упомянутая пропорциональность значений ПРВ является одинаковой для всех значений ПРВ, т.к. условия получения всех значений одни и те же. Но коэффициент пропорциональности и точность формирования ординат ПРВ функциональной зависимости зависит от объема дискретизации. Поэтому получаемые значения ПРВ дают только вид (конфигурацию) кривой ПРВ, а абсолютные значения должны быть изменены в соответствии с коэффициентом пропорциональности. Последний может быть найден из условия равенства площади под кривой ПРВ единице. Отношение единицы к площади под кривой ПРВ дает искомый коэффициент пропорциональности, на который необходимо умножить все полученные неполные ординаты кривой, чтобы получить истинные ординаты ПРВ. По истинной ПРВ функциональной зависимости путем интегрирования (суммирования произведений значений ПРВ на внешнеприлежащие интервалы) образуются значения ФРВ функциональной зависимости и неизвестные порядки квантилей ФЗ становятся известными.

Заниженные значения ординат ПРВ обусловлены тем, что при дискретизации пропадают значения СА и они, таким образом, не участвуют как в образовании дискретной системы значений СА, так и в формировании дискретных значений ФЗ и, следовательно, пропадают и вероятностные характеристики этих значений. Последние восстанавливаются с помощью нормирующего коэффициента пропорциональности для ПРВ функциональной зависимости. Этот же коэффициент справедлив и для ФРВ функциональной зависимости.

Далее необходимо реализовать вышеизложенный алгоритм выбора значений совместных вероятностных характеристик ФЗ в виде ПРВ так, чтобы ФЗ от произвольных всех случайных аргументов была равна ФЗ от всех случайных аргументов как квантилей одного заданного порядка.

Алгоритм формирования ПРВ функциональной зависимости методом СГИД

Алгоритм излагается посредством процедур для вариантов явных выражений ФЗ и реализуется программным путем по условиям возможностей расчетного комплекса для ФЗ в виде суммы 2-х, 3-х, 4-х СА. Предполагаются известными ФРВ случайных независимых аргументов X_1, …, X_i, …, X_n.

1. Выбор дискретных значений порядков квантилей или значений ФРВ случайных аргументов, т.е. 0, p_1, …, p_j, …, 1.

2. Подготовка дискретных квантилей, значений ПРВ случайных аргументов одного порядка. Для нулевого порядка:

ФРВ: $x_{10} = \mathrm{f}_1^{-1}(0), \ldots, \quad x_{i0} = \mathrm{f}_i^{-1}(0), \ldots, \quad x_{n0} = \mathrm{f}_n^{-1}(0)$,

ПРВ: $\mathrm{c}_1(x_{10})$, …, $\mathrm{c}_i(x_{i0})$, …, $\mathrm{c}_n(x_{n0})$;

аналогично для порядков p_1, p_j, 1.

3. Подготовка базовых дискретных значений ФЗ $Y = \varphi(X_1, \ldots, X_i, \ldots, X_n)$ и совместных ПРВ одного порядка:

порядка 0:

$y_0 = \varphi(x_{10}, \ldots, x_{i0}, \ldots, x_{n0})$,

$\mathrm{c}_0(x_{10}, \ldots, x_{i0}, \ldots, x_{n0}) = \mathrm{c}_1(x_{10}) \ldots \mathrm{c}_i(x_{i0}) \ldots \mathrm{c}_n(x_{n0}) = \mathrm{c}_y(\mathrm{y}_0)$;

порядка p_1:

$y_{p_1} = \varphi(x_{1p_1}, \ldots, x_{ip_1}, \ldots, x_{np_1})$,

$\mathrm{c}_{p_1}(x_{1p_1}, \ldots, x_{ip_1}, \ldots, x_{np_1}) = \mathrm{c}_1(x_{1p_1}) \ldots \mathrm{c}_i(x_i) \ldots \mathrm{c}_n(x_{np_1}) = \mathrm{c}_y(\mathrm{y}_{p_1})$;

аналогично для порядков …, p_j, 1.

4. Формирование и перебор квантилей всех порядков СА $X_1, \ldots, X_i, \ldots, X_n$ функциональной зависимости $Y = \varphi(X_1, \ldots, X_i, \ldots, X_n)$, вычисление значений ФЗ $\varphi(x_{1s}, \ldots, x_{ik}, \ldots, x_{nl})$, совместных ПРВ случайных аргументов, выбор и суммирование последних как составляющих ПРВ функциональной зависимости $Y = \varphi(X_1, \ldots, X_i, \ldots, X_n)$ по принципу равенства какому-то базовому значению ФЗ.

Обозначения порядков квантилей (индексов) СА теперь разнообразны, и значения ФЗ от них различны, но среди них есть и базовые, т.е. как от однопорядковых квантилей СА.

Таким образом, осуществляется процедура:

- если значение ФЗ $y_{\mathrm{s}\ldots,k,\ldots,l} = y_0$, то вычисляются совместные ПРВ $\mathrm{c}(x_{1s}, \ldots, x_{ik}, \ldots, x_{nl}) = \mathrm{c}_1(x_{1s}) \cdots \mathrm{c}_i(x_{ik}) \cdots \mathrm{c}_n(x_{nl})$, которые сначала занимают соответственно ячейку $\mathrm{c}(x_{10}, \ldots, x_{i0}, \ldots, x_{n0})$, а далее при переборе суммируются соответственно с содержимым данной ячейки;

- если значение ФЗ $y_{\mathrm{s}\ldots,l,\ldots,k} = y_{p_1}$, то вычисляются совместные ПРВ $\mathrm{c}(x_{1k}, \ldots, x_{il}, \ldots, x_{ns}) = \mathrm{c}_1(x_{1k}) \cdots \mathrm{c}_i(x_{il}) \cdots \mathrm{c}_n(x_{ns})$, которые сначала занимают соответственно ячейку $\mathrm{c}(x_{1p_1}, \ldots, x_{ip_1}, \ldots, x_{np_1})$, а далее при переборе суммируются соответственно с содержимым данной ячейки;

- если значение ФЗ $y_{l\ldots,s,\ldots,k} = y_1$, то вычисляются ПРВ $\mathrm{c}(x_{1l}, \ldots, x_{is}, \ldots, x_{nk}) = \mathrm{c}_1(x_{1l}) \cdots \mathrm{c}_i(x_{is}) \cdots \mathrm{c}_n(x_{nl})$, которые сначала занимают соответственно ячейку $\mathrm{c}(x_{11}, \ldots, x_{i1}, \ldots, x_{n1})$, а далее при переборе суммируются соответственно с содержимым данной ячейки.

Разнообразие совмещений СА, обуславливающих как базовые, так и иные значения ФЗ, условно демонстрируется выражениями индексов $s, \ldots, k, \ldots, l$ в обозначениях порядков квантилей СА.

После перебора всех совмещенных значений СА и суммирования содержание ячеек будет не истинными значениями искомой ПРВ функциональной зависимости $Y = \varphi(X_1, \ldots, X_i, \ldots, X_n)$, а ее образом, т.е. меньше истинного значения. Например, образ значения y_{p_j} ПРВ $\mathrm{c}_y(y_{p_j})$ функциональной зависимости равен содержимому соответствующей ячейки, т.е. сумме на конец перебора значений совместной ПРВ СА $\mathrm{c}(x_{1p_j,\ldots,} x_{ip_j,\ldots,} x_{np_j}) + \sum \mathrm{c}_{\mathrm{p_j}}(x_{1p_s,\ldots,} x_{ip_k,\ldots,} x_{np_l}) = c_y(y_{\mathrm{p_j}})$,

для которых имеет место одно и то же значение ФЗ y_{p_j}. В представленном выражении суммы на конец перебора значений совместной ПРВ СА первая составляющая – это базовое значение совместной ПРВ СА, определяемое произведением ПРВ всех СА при квантилях одного и того же порядка p_j, и ФЗ при этом равно y_{p_j}, а вторая составляющая условно отображает сумму всех остальных значений совместной ПРВ СА при переборе.

Качественное представление результата процесса перебора дает возможный дискретный график формирования образа ПРВ функциональной зависимости в точках 1’, 2’, 3’, 4’, 5’ (рис. 1). Истинные значения ПРВ (точки 1, 2, 3, 4, 5) получены путем умножения значений ПРВ точки 1’, 2’, 3’, 4’, 5’ на коэффициент, обратный площади под дискретной кривой образа ПРВ, проходящей через эти точки.

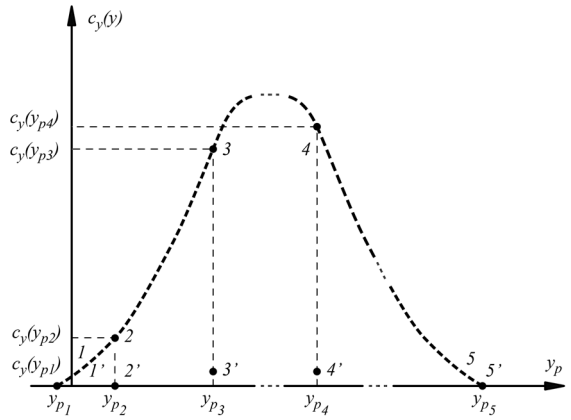


Рис. 1. Формирование плотности распределения вероятностей многомерной функциональной зависимости

Примеры полученных ЗРВ

На основе описанного алгоритма в среде Matlab была составлена программа и рассчитаны некоторые ПРВ трехмерных ФЗ (рис. 2, 3, 4).

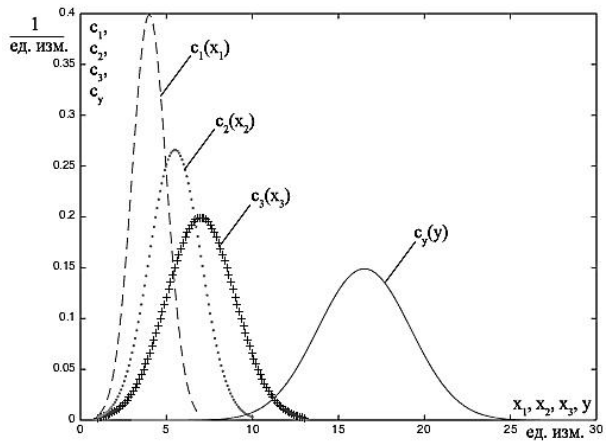


Рис. 2. Сопоставление ПРВ $c_y(y)$ функциональной зависимости $Y = X_1 + X_2 + X_3$ с ПРВ $c_1(x_1)$, $c_2(x_2)$, $c_3(x_3)$ случайных аргументов X_1, X_2, X_3

На рис. 2 $c_1(x_1)$ –ПРВ случайного аргумента X_1, нормальный ЗРВ с параметрами математическое ожидание $(МО)_1 = 4$ и среднеквадратическое отклонение $(СКО)_1 = 1$; $c_2(x_2)$ – ПРВ случайного аргумента X_2, нормальный ЗРВ с параметрами $МО_2 = 5.5$ и $СКО_2 = 1.5$; $c_3(x_3)$ – ПРВ случайного аргумента X_3, нормальный ЗРВ с параметрами $МО_3 = 7$ и $СКО_3 = 2$; $c_y(y)$ – ПРВ функциональной зависимости, тоже нормальный.

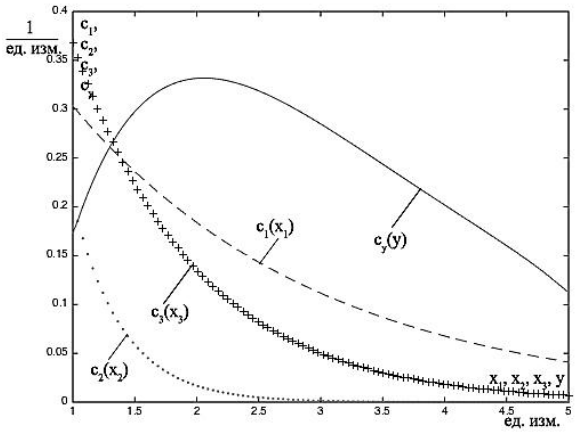


Рис. 3. Сопоставление ПРВ $c_y(y)$ функциональной зависимости $Y = X_1 + X_2 - X_3$ с ПРВ $c_1(x_1)$, $c_2(x_2)$, $c_3(x_3)$ случайных аргументов X_1, X_2, X_3

На рис. 3 $c_1(x_1)$ – ПРВ случайного аргумента X_1, экспоненциальный ЗРВ с параметром $\lambda = 1$; $c_2(x_2)$ – ПРВ случайного аргумента X_2, экспоненциальный ЗРВ с параметром $\lambda = 2$; $c_3(x_3)$ – ПРВ случайного аргумента X_3, экспоненциальный ЗРВ с параметром $\lambda = 0.4$; $c_y(y)$ – ПРВ функциональной зависимости.

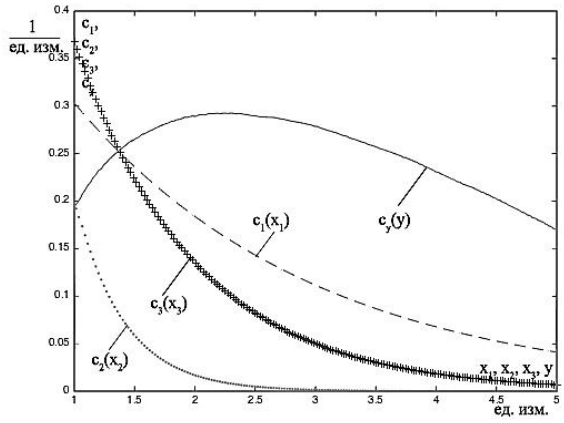


Рис. 4. Сопоставление ПРВ $c_y(y)$ функциональной зависимости $Y = X_1^2 + X_2 - X_3^2$ с ПРВ $c_1(x_1)$, $c_2(x_2)$, $c_3(x_3)$ случайных аргументов X_1, X_2, X_3

На рис. 4 $c_1(x_1)$ – ПРВ случайного аргумента X_1, экспоненциальный ЗРВ с параметром $\lambda = 1$; $c_2(x_2)$ – ПРВ случайного аргумента X_2, экспоненциальный ЗРВ с параметром $\lambda = 2$; $c_3(x_3)$ – ПРВ случайного аргумента X_3, экспоненциальный ЗРВ с

параметром $\lambda = 0.4$; $c_y(y)$ – ПРВ функциональной зависимости.

Выводы

1. Представлен вариант методики определения закона распределения вероятностей функциональной зависимости по ЗРВ случайных аргументов этой зависимости расчетным путем. Принципиальной особенностью предлагаемой методики является использование не статистической гарантии воспроизведения СА и зависящей от СА функциональной зависимости, а непосредственно прямое использование значений генеральной совокупности всех СА для определения ФЗ. Это удалось достичь благодаря управляемой дискретизации СА как квантилей одинаковых порядков из диапазона [0,1] и использованию в качестве ЗРВ как для СА, так и ФЗ плотности распределения вероятностей. Благодаря этим мерам однозначно составлены дискретные значения ФЗ, а значения ПРВ функциональной зависимости формируются как суммы совместных ПРВ всех СА, при подстановке которых в выражение ФЗ значения последней оказываются равными одному из ее дискретных значений. Полученные значения искомой ПРВ всегда меньше истинных, которые названы образом ПРВ. Значения образа ПРВ пропорциональны истинным с коэффициентом, обратным площади под огибающей дискретных значений образа искомой ПРВ. Искомая ФРВ находится путем интегрирования (суммирования) корректированной ПРВ.

2. Путем управления объемом дискретизации СА и ФЗ можно сократить количество совмещений значений всех СА, и следовательно, суммируемых совместных ПРВ при каждом значении ФЗ. Количество значений ФЗ при этом также уменьшится, однако конфигурация образа искомой ПРВ принципиально не изменится. Путем использования рассчитанного нового коэффициента пропорциональности истинные значения искомой ПРВ восстановятся, т.к. суммированные совместные ПРВ будут те же самые, хотя количество их меньше при каждом значении ФЗ, количество значений ФЗ также уменьшится.

3. Изложенная методика в чистом виде может быть применена для неявных ФЗ энергетических задач по расчету параметров режимов, электрических величин при коротких замыканиях и других повреждениях в сети. При известных ЗРВ параметров электрических режимов и процессов просто определяются риски, вероятностные характеристики небалансов, резервов и дефицитов, которые являются основой задач эксплуатации развития: определения сечений проводов линий сетей, мощностей трансформаторных и преобразовательных подстанций, фактических и располагаемых мощностей.

Литература

1. Бай Ю.Д., Шмойлов А.В. Полные вероятностные характеристики многомерных функциональных зависимостей задач электроэнергетики // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. тр. I междунар. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск, 2014. С. 66 – 69.
2. Вероятностный метод селекции границ интервалов данных для задач электроэнергетики / А.В. Шмойлов, Л.В. Кривова, Е.И. Стоянов, К.В. Игнатьев // Изв. ВУЗов «Проблемы энергетики». 2008. № 7-8-1. С. 144 –155.
3. Проблема верификации средств моделирования электроэнергетических систем и концепция ее решения/ А.А. Суворов, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов, М.В. Андреев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. Вып. 1. С. 11-23.
4. Прутик А.Ф., Чан М., Шмойлов А.В. Метод селекции границ интервалов данных для определения законов распределения функциональных зависимостей // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы всерос. науч.-техн. конф. Томск, 2010. С. 190 – 192.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.
6. Gusev A.S., Suvorov A.A., Sulaymanov A.O. Development Concept of Guaranteed Verification Electric Power System Simulation Tools and Its Realization // MATEC Web of Conferences. 2015. V. 37. P. 1 – 4.
7. Бай Ю.Д. Определение законов распределения вероятностей параметров режимов энергосистем // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы докл. 20-ой всерос. науч.-техн. конф. Томск, 2014.
8. Бай Ю.Д., Шмойлов А.В. Анализ возможностей предлагаемого метода селекции границ интервалов входных и выходных данных для получения вероятностных характеристик функциональных зависимостей задач электроэнергетики // Электротехнические преобразователи энергии: материалы VII междунар. науч.-техн. конф. Томск, 2015. С. 147-153.
9. Genz A. Numerical computation of rectangular bivariate and trivariate normal and t probabilities // Journal of Statistics and Computing. 2003. V. 14. P.251 – 260.
10. Genz A. Numerical Computation of the Multivariate Normal Probabilities // Journal of Computational and Graphical Statistics. 1992. V.1. P. 141 – 150.
11. Hsu J.C. Multiple Comparisons. London: Chapman and Hall, 1996. 277 p.
12. Олейникова С.А. Вычислительный эксперимент для анализа закона распределения случайной величины, описывающей длительность проекта в задачах сетевого

планирования и управления // Экономика и менеджмент систем управления. 2013. Вып. 3(9). С. 91 – 97.

13. Олейникова С.А. Аппроксимация закона распределения суммы случайных величин, распределенных по закону бета // Кибернетика и программирование. 2016. Вып. 6. С. 35 – 54.

Поступила 09.07.2018; принята к публикации 03.10.2018

Информация об авторах

Бай Юлий Дмитриевич – ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30), e-mail: nodius@tpu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9928-408X

Шмойлов Анатолий Васильевич – канд. техн. наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30), e-mail: shm_av@rambler.ru

Андреев Михаил Владимирович – канд. техн. наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, заведующий научно-исследовательской лабораторией "Моделирование электроэнергетических систем", Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30), e-mail: andreevmv@tpu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6420-4374

Суворов Алексей Александрович – ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30), e-mail: suvorovaa@tpu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3896-3921

Киевец Антон Владимирович – аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30), e-mail: kievec.v.l@gmail.com, ORCID: http://orcid.org/ 0000-0002-5654-7211

Разживин Игорь Андреевич – ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики**,** Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30), e-mail: lionrash@tpu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7024-0198

OBTAINING THE FULL PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE PARAMETERS OF ELECTRIC ENERGY TASKS

Yu.D. Bay, A.V. Shmoylov, M.V. Andreev, A.A. Suvorov, A.V. Kievets, I.A. Razzhivin

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract: in the tasks considered in the power industry, the parameters of stationary modes, electrical values for damage, indicators of functional reliability, power reserves of power stations, wire sections of network lines, transformer and converter stations, etc., are functional dependencies of the initial data, such as active and reactive powers, values and voltage angles of nodes of electrical networks or random arguments. Finding the complete probability characteristics — probability distribution densities (PDDs) and probability distribution functions (PDFs) of these functional dependencies — allows one to get a complete picture of all possible values that the parameters of interest can take. The main problem is that obtaining PDD and PDF of the parameter of interest by standard statistical methods currently has no practical solution. In this regard, we propose a developed method for the selection of the boundaries of input and output data (SBID), which is not critically dependent on the dimension of functional dependence (FD), considered in the article. The actual methods of statistical modeling of random arguments are presented, the method of selection of input and output data boundaries from an analytical point of view is considered, an improved algorithm for obtaining the full probability characteristics of functional dependencies is also presented, the results of low-dimensional examples are demonstrated

Key words: electric power system, numerical methods, probability distribution law, random variable, quantile, functional dependency

Acknowledgments: the reported study was funded by Ministry of Education and Science of Russian Federation, according to the research project No. 14.Y30.18.2379-MK

References

1. Bai Yu.D., Shmoylov A.V. “Full probabilistic characteristics of multidimensional functional dependences of the electric power industry problems”, *Proc. of the I Int. Sci. Conf. of Young Scientists “Electrical Engineering. Power engineering. Mechanical engineering” (Elektrotekhnika. Energetika. Mashinostroyenie: sb. tr. I mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh)*, Novosibirsk, 2014, pp. 66-69.

2. Shmoylov A.V., Krivova L.V., Stoyanov E.I., Ignat’ev K.V. “Probabilistic method of selection of the boundaries of data intervals for electric power industry problems”, *Proc. of Universities "Problems of energy science" (Izv. VUZov “Problemy energetiki”),* 2008, vol. 7-8-1, pp. 146-157.

3. Suvorov A.A., Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Andreev M.V. “Verification problem of the means of simulation of electric power systems and the concept of its solution”, *Bulletin of the Ivanovo State Energy University (Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta)*, 2017, vol. 1, pp. 11-23.

4. Prutik AF, Chan M., Shmoylov A.V. “Method of selection of the boundaries of data intervals for determining the laws of distribution of functional dependencies”, *Electricity: from reception and distribution to effective use: Proc. of the All-Russian Scientific and Technical Conference (Elektroenergiya: ot polucheniya i raspredeleniya do effektivnogo ispol'zovaniya: materialy vseros. nauch.-tekhn. konf.)*, Tomsk, 2010, pp. 190-192.

5. Ventzel E.S. “Theory of probability: manual” (“Teoriya veroyatnostey: uchebnik dlya vuzov”), Moscow, Vysshaya shkola, 1999. 576 c.

6. Gusev A.S., Suvorov A.A., Sulaymanov A.O. “Development concept of guaranteed verification electric power system simulation tools and its realization”, *MATEC Web of Conferences*, 2015, vol. 37, pp. 1-4.

7. Bai Yu.D. “Determination of the probability laws for the parameters of the power systems modes”, *Proc. of the 20th All-Russian Scientific and Technical Conference “Energy: Efficiency, Reliability, Security” (Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost': materialy dokl. 20-oy vseros. nauch.-tekhn. konf.),* Tomsk, 2014.

8. Bai Yu.D., Shmoylov A.V. “Analysis of the possibilities of the proposed method of selection of the input and output data intervals for obtaining probabilistic characteristics of the functional dependencies of the electric power industry tasks”, *Proc. of the VII International Scientific and Technical Conference "Electrotechnical Energy Converters" (Elektrotekhnicheskie preobrazovateli energii: materialy VII mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, Tomsk, 2015, pp. 147-153.

9. Genz A. “Numerical computation of rectangular bivariate and trivariate normal and t probabilities”, *Journal of Statistics and Computing*, 2003, vol. 14, pp. 251-260.

10. Genz A. “Numerical computation of the multivariate normal probabilities”, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 1992, vol.1, pp. 141-150.

11. Hsu, J. C. “Multiple comparisons”, London, Chapman and Hall, 1996, 277 p.

12. Oleynikova S.A. “Computational experiment for the analysis of the distribution law of a random variable describing the duration of the project in the tasks of network planning and management”, *Economics and Management of Control Systems (Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya),* 2013, vol. 3 (9), pp. 91-97.

13. Oleinikova S.A. “Approximation of the distribution law of a sum of random variables distributed according to the beta law”, *Cybernetics and programming (Kibernetika i programmirovanie)*, 2016, vol. 6, pp. 35-54.

Submitted 09.07.2018; revised 03.10.2018

Information about the authors

Yuliy D. Bay, Teaching Assistant of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (30 prospekt Lenina, Tomsk634050, Russia), e-mail: nodius@tpu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9928-408X

Anatoliy V. Shmoylov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (30 prospekt Lenina, Tomsk634050, Russia), e-mail: shm_av@rambler.ru

Mikhail V. Andreev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, head of R&D Lab "Modeling of Electric Power Systems", National Research Tomsk Polytechnic University (30 prospekt Lenina, Tomsk634050, Russia), e-mail: andreevmv@tpu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6420-4374

Aleksey A. Suvorov, Teaching Assistant of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (30 prospekt Lenina, Tomsk634050, Russia), e-mail: suvorovaa@tpu.ru, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3896-3921

Anton V. Kievets, Graduate student of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (30 prospekt Lenina, Tomsk634050, Russia), e-mail: kievec.v.l@gmail.com, ORCID: http://orcid.org/ 0000-0002-5654-7211

Igor’ A. Razzhivin, Teaching Assistant of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (30 prospekt Lenina, Tomsk634050, Russia), e-mail: lionrash@tpu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7024-0198

УДК 662.7

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МАЛОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

О.В. Афанасьева, Г.Р. Мингалеева

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Аннотация: объекты малой распределенной генерации выступают источниками надежного энергообеспечения потребителей, незатронутых централизованной энергосистемой. Выбор в качестве топлива местных источников энергии, в частности, твердого топлива, обеспечивает условия автономности для данных объектов, позволяет сократить затраты на доставку топлива и, соответственно, снизить стоимость производимой энергии и побочной продукции. В работе представлены схемы энерготехнологических комплексов малой мощности с производством энергии и ценной побочной продукции. В данной работе рассматривается производство активированного угля, который может использоваться в качестве сорбента, гранулированных золошлаковых материалов для строительной отрасли и товарной серы, востребованной на химических предприятиях. В рамках предлагаемой работы проведен структурный анализ рассматриваемых схем, построены информационные блок-схемы, определены внешние и внутренние связи, разрываемые потоки. В схеме с производством активированного угля выявлено четыре контура, в схеме с производством золошлаковых материалов – один контур, в схеме с производством товарной серы – десять контуров. Проведенный анализ структуры связей позволит провести расчет энергетической эффективности и оптимизировать работу станции для повышения эффективности использования топлива с учетом нужд потребителей по выпускаемой энергии и производимой продукции

Ключевые слова: твердое топливо, малая энергетика, технологические схемы, структурный анализ, побочные продукты

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00295 «А»

Введение

Во многих странах малая распределенная генерация является динамично развивающимся направлением в энергетике [1, 2]. В нашей стране, из-за отсутствия нормативно-правовых актов, неурегулированности отношений с сетевыми компаниями, которые определяют порядок и форму технологического присоединения к сетям, данное направление пока не нашло широкого применения. По данным различных источников, доля малой энергетики в нашей стране составляет на сегодняшний день 6-7%.

Однако Энергетическая стратегия России до 2030 года предусматривается развитие малой распределенной энергетики в качестве важнейшего направления. Малая энергетика преимущественно актуальна для энергоснабжения удаленных районов, нуждающихся в надежном энергообеспечении, при этом важно соблюдение баланса с централизованной энергосистемой. Нужно отчетливо понимать, что малая энергетика выступает дополнением к энергосистеме, а не конкурирует с ней.

К настоящему времени в распределенной энергетике разработаны и используются различные технологии и установки: газопоршневые и газотурбинные, тепловые насосы, современные паровые котлы, а также гибридные технологии – сочетание традиционной и возобновляемой энергетики. Это в свою очередь является стимулом для роста инноваций и модернизации объектов, обеспечения конкурентного преимущества на рынке.

Малая энергетика создает дополнительные возможности для потребителей и позволяет им обеспечить себя качественной электрической и тепловой энергией, не зависеть от перебоев в энергоснабжении, природных катаклизмов.

Наиболее распространенным топливом на объектах малой генерации является природный газ, однако, использование местных видов топлива, в частности твердого, создает определенную автономность для данных объектов: доставка любым видом транспорта (автомобильный, речной, железнодорожный), стабильный уровень цен, возможность организации склада в холодное время года, когда доставка топлива бывает затруднительна. Вместе с тем экологические последствия использования твердого топлива во многом препятствуют

© Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р., 2018

его широкому внедрению на объектах малой генерации. Оптимальным решением в этом случае может стать использование технологий термической переработки (газификация и пиролиз) с получением ценных побочных продуктов (активированный уголь, сера, золошлаковые материалы, кокс, смола).

В литературных источниках примеры технологических решений для объектов малой энергетики (мини-ТЭС), работающих на твердом топливе, встречаются не так часто [3-4]. Последние работы все больше ориентированы на использование гибридных технологий [5-7].

Учитывая, что наша страна обладает значительными запасами твердого топлива, для многих регионов оно является местным, его использование с учетом внедрения экологически чистых технологий можно рассматривать как актуальную задачу.

В рамках данной статьи представлено описание технологических решений для объектов малой генерации, ориентированных на использование твердого топлива, с получением побочных продуктов. Посредством проведения структурного анализа выявлены внешние и внутренние связи в системах, определена структурная организация схем, что послужит основой определения эффективности функционирования данных объектов.

Структура мини-ТЭС и основы системного анализа

Технологическая схема мини-ТЭС с учетом протекающих в ней физико-химических процессов, представляет собой энерготехнологическую систему – совокупность взаимосвязанных технологическими потоками аппаратов, которые характеризуются определенной последовательностью технологических операций. Основными блоками в структуре мини-ТЭС являются следующие: подготовка твердого топлива, термическая переработка, очистка генераторного газа от вредных примесей, получение тепловой и электрической энергии, выделение целевых продуктов. Элементами в данной системе служат аппараты, которые обеспечивают протекание процессов.

При исследовании энерготехнологической системы анализируются те свойства элемента (аппарата), которые определяют его взаимодействие с другими элементами и оказывают влияние на всю систему в целом. Функционирование энерготехнологических систем, по аналогии с химико-технологическими системами, которые рассматриваются в трудах В.В. Кафарова, представляется как последовательность смен состояний системы, которые определяются набором входных и выходных переменных [8]. Входные переменные – это физические параметры входных потоков исходного топлива, теплоносителей, а также параметры воздействий окружающей среды на процесс функционирования системы, такие как температура и давление. Выходные параметры – это физические параметры материальных и энергетических потоков побочных продуктов на выходе, электрическая и тепловая энергия.

При исследовании режимных параметров энерготехнологической схемы должна быть определена последовательность расчета аппаратов и блоков. Наиболее рациональным методом в этом случае является структурный анализ, который предполагает последовательное выполнение нескольких этапов [9].

1. На первом этапе формируется информационная блок-схема (ИБС) на основе выявления связей между элементами. Топология структуры теплотехнологической схемы мини-ТЭС отображается в виде ИБС, которая представляет собой ориентированный граф, в котором вершины – это вычислительные блоки соответствующих аппаратов, а дуги – потоки вещества и энергии.

2. Далее ИБС представляется в цифровой форме в виде матрицы процесса или матрицы смежности. Матрица смежности в этом случае является более удобной для идентификации имеющихся в блок-схеме замкнутых контуров. Матрица смежности включает значения «0» (отсутствие связей между блоками) и «1» (наличие связей между соответствующими блоками).

3. Путем удаления нулевых строк и столбцов формируется сокращенная матрица смежности. Строка или столбец в матрице смежности, содержащая только нули, означает, что ни один элемент, входящий в них, не связан с соответствующим блоком в строке или столбце, а сам блок связан только с внешней средой посредством входящих или выходящих потоков. Следовательно, данный блок может быть удален из матрицы смежности. Процесс удаления нулевых строк и столбцов осуществляется в течение нескольких циклов, в результате получается итоговая матрица смежности.

4. На данном этапе создается матрица циклов, позволяющая выявлять контуры и оп-

тимальные места их разрыва. Каждый контур имеет свой ранг, то есть количество образующих его потоков, а поток – соответствующую частоту, показывающую количество контуров, в которых появляется данный поток.

5. Формируется сокращенная матрица циклов, которая позволяет выявить условно-разрываемые потоки. Минимизация числа условно-разрываемых потоков достигается следующим образом: анализируется вхождение потока i в поток j, затем определяется каждый контур, который содержит поток i, включающий в себя поток j. Таким образом, исключаются потоки, которые могут входить в другие потоки этих же контуров. Разрываются потоки, имеющие максимальную частоту и входящие в контур наименьшего ранга.

6. На основе декомпозиции по слабым связям определяется последовательность расчета аппаратов.

Описание технологической схемы мини-ТЭС

На основании проведенного литературного поиска, с учетом требований по экологической составляющей по выработке энергии из твердого топлива, авторами были разработаны технологические схемы объектов распределенной генерации с производством электрической, тепловой энергии и побочных продуктов: активированного угля, золошлаковых материалов, товарной серы [11-13].

Способ получения энергии и активированного угля на станции малой мощности следующий. Поступивший на станцию уголь измельчается и подсушивается в мельнице за счет воздуха, подаваемого из воздухоподогревателя. Затем одна часть угля направляется в пиролизер, а другая (меньшая) в технологическую топку. Продукты сгорания, образующиеся при сжигании угля в технологической топке, направляются в пиролизер и используются в качестве нагревающего и ожижающего агента. В процессе псевдоожижения в пиролизере образуется парогазовая смесь, которая пройдя систему очистки от смол, поступает в камеру сгорания газотурбинной установки (ГТУ). В воздухоподогревателе парогазовая смесь охлаждается за счет подогрева воздуха, который используется в качестве сушильного агента для сушки угля в мельнице и окислителя в технологической топке.

После пиролизера поток образующегося полукокса разделяется на два потока: одна часть направляется в газогенератор, куда также подается воздух из мельницы после сушки угля, а другая, оставшаяся часть полукокса из пиролизера поступает в активатор для получения активированного угля.

В газогенераторе образуется генераторный газ, который, смешиваясь с пиролизным газом, используется в качестве топлива для ГТУ. Продукты сгорания от ГТУ направляются в котел-утилизатор для выработки тепловой энергии.

С целью активирования угля в активатор подаются продукты сгорания из технологической топки и водяной пар. Количество подаваемого полукокса в активатор и в газогенератор может варьироваться в зависимости от потребностей в выпуске продукции и необходимой электрической нагрузке. В моменты пиковых нагрузок весь полукокс может идти на производство генераторного газа и активированный уголь не производится.

Процесс получения тепловой, электрической энергии и золошлаковых материалов описан ниже.

Измельченный уголь подается в газогенератор, в качестве окислителя используются воздух и водяной пар. Большая часть образовавшейся золы в газогенераторе уносится с генераторным газом, оставшаяся вместе со шлаком проваливается через решетку в приемный бункер. После охлаждения в теплообменнике и очистки в циклоне генераторный газ направляется в газотурбинную установку для выработки электрической энергии, а зола, уловленная в циклоне, по конвейеру транспортируется в сборный бункер золы и шлака. Продукты сгорания, отработанные в ГТУ, поступают в котел-утилизатор для выработки пара. Из бункера после газогенератора шлак и часть золы подаются на ленточный конвейер. Через воздуходувку на конвейер подается воздух, где он воспринимает тепло от шлака, а затем нагретый поступает в качестве окислителя в газогенератор. Таким образом, система охлаждения шлака является замкнутой и исключает потери его теплоты. Далее шлак транспортируется к дробилке и затем по конвейеру с помощью пневмокамерного насоса подается в сборную емкость золы и шлака. Далее по конвейеру зола и шлак поступают в гранулятор. В грануляторе при добавлении связующей жидкости образуются гранулы. Да-

лее гранулы по питателю поступают в установку фасовки и затем направляются на склад. Данная схема применима для углей с высокой зольностью.

По аналогии с предыдущими технологическими решениями в схеме получения энергии и товарной серы процесс подготовки топлива включает его сушку, измельчение в мельнице и газификацию в газогенераторе. Предварительно охлажденный в теплообменнике генераторный газ направляется в циклон и фильтр для очистки от твердых крупных и мелких частиц, и затем поступает в адсорбер вместе с воздухом (или аммиаком) и активированным углем. После насыщения слоя, которое определяется по появлению небольших количеств сероводорода в очищенном газе, генераторный газ подается во второй адсорбер, в то время как первый адсорбер выключается с целью регенерации активированного угля.

Регенерация угля проводится экстрагированием серы водным раствором сернистого аммония с последующей пропаркой угля для удаления остаточного сернистого аммония. Насыщенный раствор сернистого аммония из первого резервуара подается в насыщенный слой первого адсорбера до полного закрытия угля жидкостью. Затем после выдержки раствора, с целью растворения серы, его отправляют обратно в первый резервуар. Процесс экстракции повторяется, путем закачивания раствора сернистого аммония из второго, третьего и четвертого резервуаров до того момента, что раствор из последнего резервуара контактирует с практически полностью очищенным активированным углем.

Далее активированный уголь, в котором содержится только раствор сернистого аммония, проходит обработку насыщенным паром. После процесса пропаривания адсорбер может использоваться повторно в цикле. Пары, которые выделяются при пропаривании слоя и содержат аммиак, сероводород и воду, конденсируются в оросительном конденсаторе. Образующийся конденсат поступает в пятый резервуар, из которого перекачивается в предыдущий резервуар с раствором сернистого аммония. После нескольких циклов раствор сернистого аммония в первом резервуаре оказывается насыщенным. Насыщенный раствор из первого резервуара подается в выпарной аппарат, где его обрабатывают острым паром, в результате чего сернистый аммоний подвергается разложению. Содержащие сероводород, аммиак и воду отходящие пары конденсируются в конденсаторе. Твердая сера с небольшим количеством воды выводится в нижней части выпарного аппарата. Вода, которая отделяется от серы в центрифуге, используется для орошения конденсатора. Сера на выходе получается в виде зерен с влажностью 1-2 %. Зола, отделяющаяся в циклоне, направляется в систему золошлакоудаления, туда же может направляться шлак от газогенератора. Далее очищенный генераторный газ направляется в камеру сгорания ГТУ для выработки электрической энергии, а продукты сгорания от ГТУ в котел-утилизатор для выработки пара.

Системный анализ технологических схем

В соответствии с основными положениями структурного анализа и на основании описанных технологических решений составляются информационные блок-схемы (ИБС) в виде ориентированного графа, в котором элементы технологической схемы являются вершинами, а технологические потоки - ребрами.

На рис. 1 представлена ИБС мини-ТЭС с получением активированного угля.

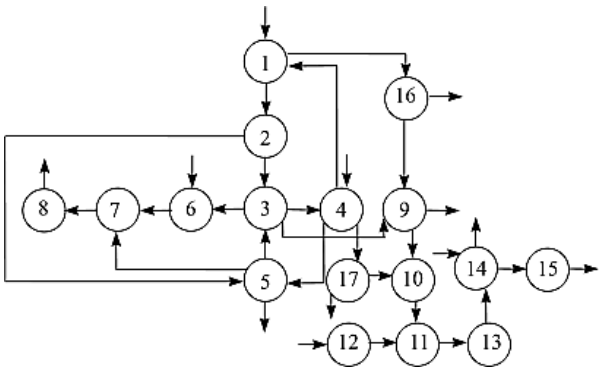


Рис. 1. ИБС с получением активированного угля

В табл. 1 приведены характеристики информационных потоков ИБС.

Таблица 1

Потоки ИБС с получением активированного угля

№ потока	Направление связи между аппаратами	Наименование потока
1	1→2	уголь
2	1→16	сушильный агент
3	2→3	уголь
4	2→5	уголь

Продолжение табл. 1

5	3→4	парогазовая смесь
6	3→6	полукокс
7	3→9	полукокс
8	4→1	воздух
9	4→5	воздух
10	4→10	парогазовая смесь
11	5→3	продукты сгорания
12	5→7	продукты сгорания
13	6→7	активированный уголь
14	7→8	активированный уголь
15	9→10	генераторный газ
16	10→11	генераторный газ
17	11→13	продукты сгорания
18	12→11	воздух
19	13→14	продукты сгорания
20	14→15	продукты сгорания
21	16→9	сушильный агент (окислитель)
22	4→17	парогазовая смесь
23	17→10	парогазовая смесь
24	→1	уголь
25	→4	воздух
26	5→	золошлаковые отходы
27	→6	водяной пар
28	8→	активированный уголь
29	9→	золошлаковые отходы
30	→12	воздух
31	→14	вода
32	14→	водяной пар
33	15→	продукты сгорания
34	16→	пылевая фракция
35	17→	фракция смолы

На рис. 2 изображена ИБС мини-ТЭС с получением золошлаковых материалов, в табл. 2 приведены характеристики информационных потоков ИБС.

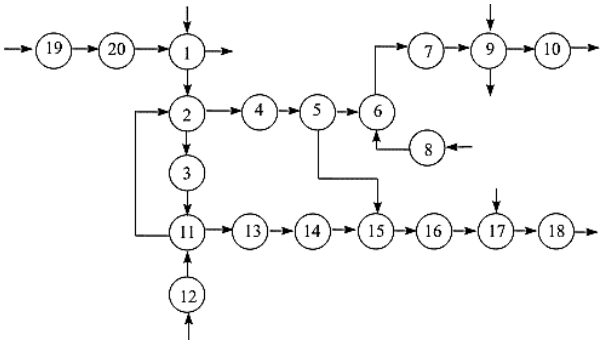


Рис. 2. ИБС с получением золошлаковых материалов

Таблица 2

Потоки ИБС с получением золошлаковых материалов

№ потока	Направление связи между аппаратами	Наименование потока
1	1→2	уголь
2	2→3	золошлаковые отходы
3	2→4	генераторный газ
4	3→11	золошлаковые отходы
5	4→5	генераторный газ
6	5→6	очищенный генераторный газ
7	5→15	золошлаковые отходы
8	6→7	генераторный газ
9	7→9	продукты сгорания
10	8→6	воздух
11	9→10	продукты сгорания
12	11→2	воздух
13	11→13	золошлаковые отходы
14	12→11	воздух
15	13→14	золошлаковые отходы
16	14→15	золошлаковые отходы

Продолжение табл. 2

17	15→16	золошлаковые отходы
18	16→17	золошлаковые отходы
19	17→18	гранулы
20	19→20	воздух
21	20→1	воздух
22	→1	уголь
23	1→	сушильный агент
24	→8	воздух
25	→9	вода
26	9→	водяной пар
27	10→	дымовые газы
28	→12	воздух
29	→17	связующая жидкость
30	→19	воздух

ИБС мини-ТЭС с получением товарной серы показана на рис. 3, в табл. 3 приведены характеристики информационных потоков ИБС.

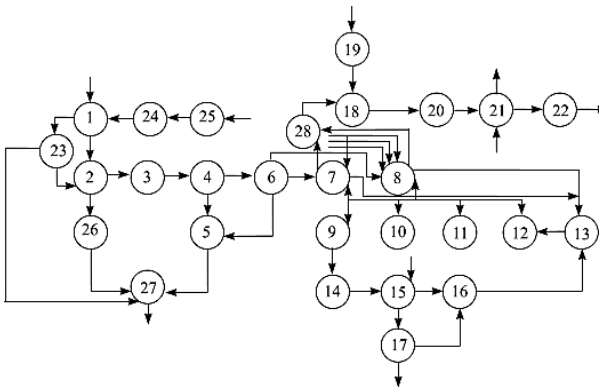


Рис. 3. ИБС мини-ТЭС с получением товарной серы

Таблица 3

Потоки ИБС с получением товарной серы

№ потока	Направление связи между аппаратами	Наименование потока
1	1→2	уголь
2	1→23	сушильный агент
3	2→3	генераторный газ
4	2→26	золошлаковые отходы
5	3→4	генераторный газ
6	4→5	золошлаковые отходы
7	4→6	генераторный газ

Продолжение табл. 3

8	5→27	золошлаковые отходы
9	6→5	золошлаковые отходы
10	6→7	генераторный газ
11	6→8	генераторный газ
12	7→9	раствор сернистого аммония
13	7→10	раствор сернистого аммония
14	7→11	раствор сернистого аммония
15	7→12	раствор сернистого аммония
16	7→13	пары раствора сернистого аммония
17	7→28	генераторный газ
18	8→9	раствор сернистого аммония
19	8→10	раствор сернистого аммония
20	8→11	раствор сернистого аммония
21	8→12	раствор сернистого аммония
22	8→13	пары раствора сернистого аммония
23	8→28	генераторный газ
24	9→7	раствор сернистого аммония
25	9→8	раствор сернистого аммония
26	9→14	насыщенный раствор сернистого аммония
27	10→7	раствор сернистого аммония
28	10→8	раствор сернистого аммония
29	11→7	раствор сернистого аммония
30	11→8	раствор сернистого аммония
31	12→7	раствор сернистого аммония
32	12→8	раствор сернистого аммония
33	13→12	раствор сернистого аммония
34	14→15	насыщенный раствор сернистого аммония

Окончание табл. 3

35	15→16	пары, содержащие сероводород, аммиак и воду
36	15→17	твердая сера с водой
37	16→13	конденсат
38	17→16	вода
39	18→20	генераторный газ
40	19→18	воздух
41	20→21	продукты сгорания
42	21→22	продукты сгорания
43	23→2	сушильный агент
44	23→27	фракция пыли
45	24→1	воздух
46	25→24	воздух
47	26→27	золошлаковые отходы
48	28→18	генераторный газ
49	→1	уголь
50	→7	водяной пар
51	→7	аммиак
52	→7	активированный уголь
53	→8	водяной пар
54	→8	аммиак
55	→8	активированный уголь
56	→15	водяной пар
57	17→	сера
58	→19	воздух
59	→21	вода
60	21→	водяной пар
61	22→	дымовые газы
62	→25	воздух
63	27→	золошлаковые отходы

Результаты и выводы

В ходе проведения структурного анализа получены следующие результаты.

В первой схеме выявлено 4 контура, во второй 1 контур, в третьей 10 контуров. Количество условно разрываемых потоков для первой схемы один (поток № 5), для второй схемы нет разрываемых потоков, для третьей два (№ 13, № 14).

Согласно выполненным ранее расчетам по аналогичным схемам мини-ТЭС с выпуском побочной продукции при мощности станции 15,2 МВт объем реализованной продукции составит: активированного угля – 197976 т/год, золошлаковых материалов – 21549 т/год, товарной серы – 3,8 т/год.

Таким образом, разработанные технологические решения позволяют помимо тепловой и электрической энергии производить ценное сырье (активированный уголь, золошлаковые материалы, товарная сера), которое может быть востребовано ближайшими потребителями. Компоновка мини-ТЭС, как видно из структурных схем, имеет блочную структуру, что позволяет формировать технологическую схему разными блоками с учетом запросов потребителей и качества используемого топлива.

Структурный анализ позволил определить последовательность расчета по вычислению энергетической эффективности схем, проведению оптимизации технологических решений с целью выявления оптимальной технологической схемы в зависимости от потребности в наличии выпуска побочной продукции, графика нагрузки по электрической и тепловой энергии и качества используемого топлива.

Литература

1. Implications of Decentralised Energy Planning for Rural India / R.B. Hiremath, B. Kumar, P. Balachandra, N.H. Ravindranath // Journal of Sustainable Energy & Environment 2. 2011.P. 31-40.

2. Daniel R. Schneidera, Neven Duic´a, Z˘eljko Bogdana. Mapping the potential for decentralized energy generation based on renewable energy sources in the Republic of Croatia // Energy 32 (2007) P. 1731–1744.

3. Dubinin A.M., Shcheklein S.E. Mini coal-fired CHP plant on the basis of synthesisgas generator (CO + H_2) and electrochemicalcurrent generator // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. Is. 41, P. 26048-26058.

4. Modeling and Simulation of CO_2 Capture Process for Coal-based Power Plant using Amine Solvent in South Korea / Youngsub Lim, Jeongnam Kim, Jaeheum Jung, Chi Seob Lee, Chonghun Han // Energy Procedia 37 (2013), P. 1855 – 1862.

5. João Soares, Armando C. Oliveira. Numerical simulation of a hybrid concentrated solar power/biomass mini power plant//Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 111. P. 1378-1386.

6. Najjar M. B., Edmond Ghoulam, Hanna Fares. Mini Renewable Hybrid Distributed Power Plants for Lebanon // Energy Procedia. 2012. Vol. 18. P. 612-621.

7. Raffaele Spinelli, Luigi Pari, Natascia Magagnotti. New biomass products, small-scale plants and vertical integration as opportunities for rural development // Biomass and Bioenergy. 2018. Vol. 115. P. 244-252.

8. Кафаров В.В., Перов В.Л., Мешалкин В.Г. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. М.: Химия, 1974. 344 с.

9. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1978.

10. Назмеев Ю.Г., Мингалеева Г.Р. Система топливоподачи и пылеприготовления ТЭС: справочное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2005. С. 479.

11. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р., Пятыгина М.В. Процессы термической переработки твердого топлива на мини-теплоэлектростанциях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 9 (128). С. 125-128.

12. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р. Разработка технологической схемы золошлакоудаления на мини-ТЭС, работающих на твердом топливе // Промышленная энергетика. № 11. 2015. С. 41-46.

13. Афанасьева О.В., Мингалеева Г.Р., Вафин А.Р. Разработка технологической схемы утилизации сероводорода с получением побочного продукта на мини-ТЭС // Энергоресурсоэффективность и энергосбережение: доклады XVIII Междунар. симпозиума. Казань, 2018. С. 185-188.

Поступила 11.09.2018; принята к публикации 10.10.2018

Информация об авторах

Афанасьева Ольга Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры энергетического машиностроения, начальник Управления научных исследований, инноваций и разработок, Казанский государственный энергетический университет (420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51); доцент кафедры оборудования пищевых производств, Казанский национальный исследовательский технологический университет (420015, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 68), e-mail: eccolga@mail.ru

Мингалеева Гузель Рашидовна – д-р техн. наук, зав. кафедрой энергетического машиностроения, Казанский государственный энергетический университет (420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51), e-mail: mingaleeva-gr@mail.ru

STRUCTURAL ANALYSIS OF ENERGY-TECHNOLOGY COMPLEXES OF SMALL DISTRIBUTED GENERATION

O.V. Afanas'eva, G.R. Mingaleeva

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: objects of small distributed generation are sources of reliable power supply to consumers unaffected by a centralized power system. The choice of local energy sources, in particular solid fuel, as a fuel, provides the conditions of autonomy for these objects, allows reducing the cost of fuel delivery and, consequently, reducing the cost of energy and by-products produced. In the article, schemes of low-capacity power plant with production of energy and valuable by-products are presented. This paper discusses the production of activated carbon, which can be used as sorbent, granulated ash-slag materials for the construction industry and commercial sulfur, demanded in chemical plants. Within the framework of the proposed work, a structural analysis of the schemes in question was carried out, information flowcharts were constructed, external and internal relationships and torn flows were identified. In the scheme with the production of activated carbon, four circuits are revealed, in the scheme with the production of ash and slag materials - one circuit, in the scheme with the production of commodity sulfur - ten contours. The analysis of the structure of the connections will allow one to calculate the energy efficiency and optimize the work of the station in order to increase the efficiency of fuel use taking into account the needs of consumers for the output of energy and products

Key words: solid fuel, small energy, technological schemes, structural analysis, by-products

Acknowledgements: the reported study was funded by RFBR, in the framework of the research project № 17-08-00295 «А»

References

1. Hiremath R.B., Kumar B., Balachandra P., Ravindranath N.H. "Implications of decentralized energyplanning for rural india", *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 2011, vol. 2, pp. 31-40.

2. Daniel R. Schneidera, Neven Duic´a, Z˘eljko Bogdana "Mapping the potential for decentralized energy generation based on renewable energy sources in the Republic of Croatia", *Energy*, 2007,vol. 32, pp. 1731-1744.

3. Dubinin A.M., Schcheklein S.E. "Mini CHP plant on the basis of synthesis gas generator (CO + H2) and electrochemical current generator", *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, issue 41, pp. 26048-26058.

4. Youngsub Lim, Jeongnam Kim, Jaeheum Jung, Chi Seob Lee, Chonghun Han "Modeling and simulation of CO_2 capture process for coal-based power plant using amine solvent in South Korea", *Energy Procedia*, 2013, vol. 37, pp. 1855-1862.

5. João Soares, Armando C. Oliveira "Numerical simulation of a hybrid concentrated solar power / biomass mini power plant", *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 111, pp. 1378-1386.

6. Najjar M.B., Ghoulam E., Fares H. "Mini renewable hybrid distributed power plants for Lebanon", *Energy Procedia*, 2012, vol. 18, pp. 612-621.

7. Raffaele Spinelli, Luigi Pari, Natascia Magagnotti "New biomass products, small-scale plants and vertical integration", *Biomass and Bioenergy*, 2018, vol. 115, pp. 244-252.

8. Kafarov V.V., Perov V.L., Meshalkin V.G. “Principles of mathematical modeling of chemical-technological systems” (“Printsipy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh sistem”), Moscow, Khimiya, 1974, 344 p.

9. Popyrin L.S. “Mathematical modeling and optimization of heat power plants” (“Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teploenergeticheskikh ustanovok”), Moscow, Energia, 1978.

10. Nazmeev Yu.G., Mingaleeva G.R. “Fuel supply system and dust preparation of thermal power plants: reference book” (“Sistema toplivopodachi i pyleprigotovleniya TES: spravochnoe posobie”), Moscow, Publishing house MEI, 2005, 479 p.

11. Afanas’eva O.V., Mingaleeva G.R., Pyatygina M.V. “Thermal processing of solid fuel at mini-electric power stations”, *Bulletin of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 21, no. 9 (128), pp. 125-128.

12. Afanas’eva O.V., Mingaleeva G.R. “Development of the technological scheme of ash and slag removal on mini-TPPs operating on solid fuel”, *Industrial power (Promyshlennaya energetika)*, 2015, no. 11, pp. 41-46.

13. Afanas’eva O.V., Mingaleeva G.R., Vafin A.R. “Development of a technological scheme for the utilization of hydrogen sulfide with the production of a by-product at a mini-TPP”, *Proc. of XVIII International Symposium "Energy Resource Efficiency and Energy Saving" (Energoresursoeffektivnost' i energosberezhenie: doklady XVIII Mezhdunar. simpoziuma)*, Kazan, 2018, pp. 185-188.

Submitted 11.09.2018; revised 10.10.2018

Information about the authors

Ol’ga V. Afanas’eva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Kazan State Power Engineering University (51 Krasnosel’skaya st., Kazan 420066, Russia); Associate Professor, Kazan National Research Technological University (68 K. Marx st., Kazan 420015, Russia), e-mail: eccolga@mail.ru

Guzel R. Mingaleeva, Dr. Sc. (Technical), Head of department, Kazan State Power Engineering University (51 Krasnosel’skaya st., Kazan 420066, Russia), e-mail: mingaleeva-gr@mail.ru

УДК 621.313

ВЫБОР ОБМОТОК ДИСКОВОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Т.Е. Черных[1], С.А. Белозоров[2], А.В. Тикунов[1]

[1]Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия
[2]Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: модернизация уже имеющегося, а также разработка нового электротехнического и электроэнергетического оборудования всегда являлись актуальными задачами. В последнее десятилетие этот вопрос стал еще более важным в связи с необходимостью развития энергосберегающих технологий в электроэнергетике и внедрения новых технологий получения электрической энергии, к которым относятся альтернативные возобновляемые источники энергии, в частности ветроэнергетика. В российской ветроэнергетике существует довольно много проблем, связанных с тем, что данное направление в нашей стране длительное время не развивалось, в связи с чем практически полностью отсутствуют современные конструктивные решения как ветроэнергетических установок, так и отдельных ее узлов, удовлетворяющих сегодняшним потребностям. В частности, в российских установках разработчики чаще всего используют электрические генераторы зарубежного производства, либо это электрическая машина общепромышленного назначения. Однако для получения высоких энергетических показателей ветроэнергетической установки целесообразно использовать специализированный генератор, отвечающий ряду требований. В связи с чем предлагается конструкция специализированного синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов для вертикально-осевой ветроэнергетической установки, отвечающего данным требованиям, а также предлагаются различные варианты выполнения обмоток

Ключевые слова: синхронный генератор, постоянные магниты, схема обмотки, форма катушек

Введение

На сегодняшний день вопрос получения электрической энергии при помощи технологий, использующих возобновляемые источники энергии, в нашей стране является весьма актуальной задачей. Одним из самых перспективных и успешно развивающихся направлений возобновляемой электроэнергетики является ветроэнергетика.

В этой отрасли за последнее десятилетие в нашей стране достигнуты довольно высокие результаты, однако существует и ряд проблем. Одной из таких проблем является то, что на большей территории нашей страны преобладают ветра с низкими скоростями (порядка 4-5 м/с), что в значительной мере ограничивает использование ветроэнергетических установок (ВЭУ). Решить данную проблему пытаются несколькими путями:

– разработкой новых конструкций первичных двигателей – ветроколес;

– разработкой новых конструкций электрогенераторов, позволяющих получать высокие энергетические показатели даже при низких скоростях ветра.

При разработке новых ветроколес разработчики отдают предпочтение вертикальным типам, так как они позволяют использовать ветра с низкими скоростями.

При разработке новых конструкций специализированных генераторов на текущий момент предпочтение отдается синхронным машинам с возбуждением от постоянных магнитов. Это объясняется тем, что именно этот тип электрических генераторов наиболее удовлетворяет всем требованиям, которые предъявляются к генераторам, работающим в составе ВЭУ:

– отсутствие скользящих контактов;

– высокая надежность;

– максимально простая конструкция для обеспечения возможности ремонта «на месте» путем замены элементов конструкции.

Кроме этого, генератор для ВЭУ, учитывая современные тенденции в разработке ветроколес вертикального типа, должен иметь конструкцию с вертикальным валом, а также предусматривать возможность исключения из состава ВЭУ повышающего редуктора – мультипликатора, то есть генератор должен быть низкооборотным.

Всем вышеизложенным требованиям наиболее соответствует дисковая или торцевая конструктивная схема генератора, кроме того при такой компоновке электрической машины появляется возможность построения модульной

© Черных Т.Е., Белозоров С.А., Тикунов А.В., 2018

схемы, то есть при необходимости увеличения мощности ВЭУ добавлять модуль генератора.

Разработке подобных машин уделяется очень много внимания, однако серийное производство подобных машин не ведется, так как все эти работы носят научно-исследовательский характер. Один из самых важных вопросов в этих работах – разработка методик проектирования энергоэффективных синхронных дисковых генераторов [1, 2]. При этом возникает ряд вопросов связанных с особенностями конструкции, в частности с обмотками дисковых машин.

В таких генераторах обмотка должна быть выполнена плоской и располагаться в кольце, ограниченного двумя диаметрами (рис. 1). Обмотка укладывается непосредственно в воздушный зазор, без использования магнитопроводов с пазами. Такие обмотки в связи с отсутствием распространённости машин такого типа, почти не исследовались. Отсутствуют методики их расчёта, оценки эффективности использования того или иного исполнения обмоток в специализированных генераторах.

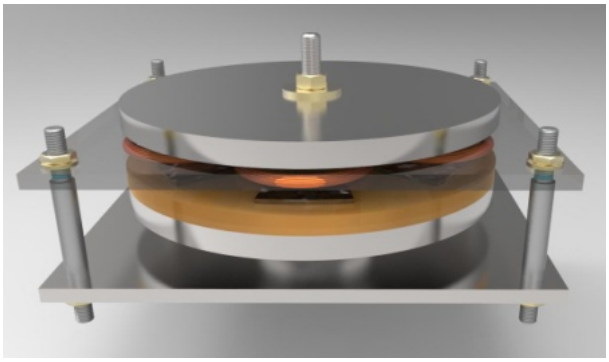


Рис. 1. Внешний вид генератора

В ходе проведенных исследований нами было принято решение, что для дискового синхронного генератора, возможно использовать однослойную катушечную и двухплоскостную, а также двухслойную петлевую обмотки.

Однослойная катушечная обмотка

Рассмотрим *однослойную катушечную обмотку*, получившую наибольшее распространение при «самодельном» (не промышленном) изготовлении синхронных генераторов из-за простоты изготовления. Форма катушек, как правило, круглая, в редких случаях эллиптическая. Поэтому при изготовлении достаточно осуществить намотку необходимого количества круглых катушек и соединить друг с другом по схеме. Схема однослойной катушечной обмотки для четырех полюсной конструкции машины представлена на рис. 2.

При использовании данной схемы обмотки возможно увеличить число катушек в два раза, тем самым получив 12 катушек, при этом сечение каждой катушки уменьшится в 2 раза (рис. 3).

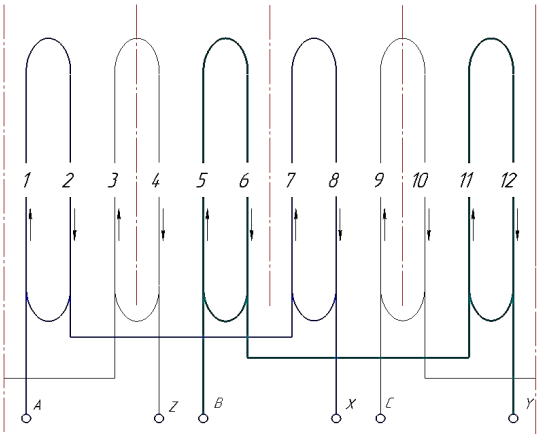


Рис. 2. Схема трёхфазной катушечной обмотки на 6 катушек

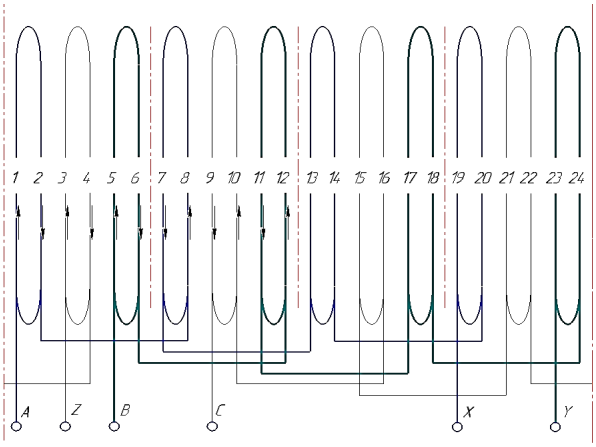
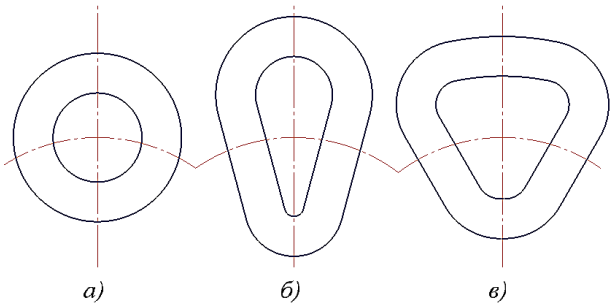


Рис. 3. Схема трёхфазной катушечной обмотки на 12 катушек

Для увеличения потока проходящего через катушку необходимо форму катушки сформировать таким образом, чтобы она максимально охватывала полюса магнита. На рис. 4 представлены некоторые возможные формы катушек.



а) круглая; б) грушевидная; в) треугольная

Рис. 4. Возможные формы катушек однослойной обмотки

Отметим достоинства и недостатки каждой формы катушек:

– Круглая форма катушки (рис. 4а): к «плюсам» круглой катушки можно отнести технологичность изготовления, которая заключается в отсутствии операций формовки катушки после ее намотки, отсутствие динамических усилий при намотке, в отличие от других форм катушек, а также минимальный расход обмоточного провода. К недостаткам такой формы катушек можно отнести минимальную область перекрытия магнитного потока полюсов.

– К достоинствам треугольной катушки (рис. 4в) можно отнести максимальную область перекрытия магнитного потока от полюсов; к недостаткам – максимальный расход обмоточного провода.

– Для грушевидной катушки (рис. 4б), которая является промежуточным вариантом между треугольной и круглой катушками, достоинства и недостатки усредняются относительно рассмотренных выше типов катушек.

Определим геометрические размеры катушек рассмотренных форм и накладываемые на них ограничения. Размеры будем рассчитывать исходя из следующих данных:

– ширина сечения катушки - $b_{кат}$;

– высота сечения катушки - $h_{кат}$;

– средний диаметр магнитопровода - l_{δ};

– длина воздушного зазора магнитопровода - $D_{ср}$.

Для круглой формы катушки геометрические размеры представлены на рис. 5.

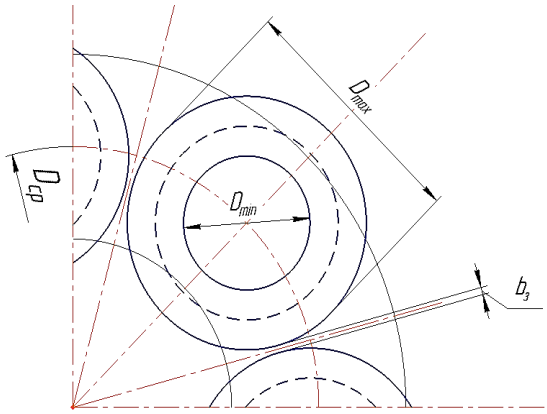


Рис. 5. Размеры круглой катушки обмотки

Максимальный диаметр катушки:

$$D_{\max} = D_{ср} \cdot \sin\left(\frac{360°}{Z}\right) - b_з, \qquad (1)$$

где $b_з$– величина зазора между катушками.

Минимальный диаметр катушки:

$$D_{\min} = D_{\max} - 2 \cdot b_{кат}. \qquad (2)$$

Для грушевидной формы катушки размеры представлены на рис. 6.

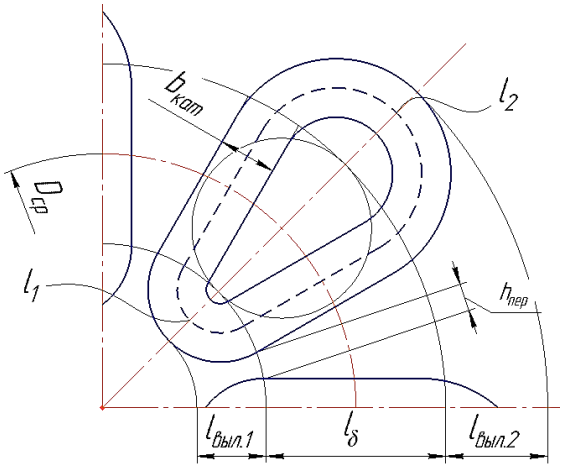


Рис. 6. Размеры грушевидной катушки обмотки

Введём ограничения, накладываемые на размеры геометрии грушевидной обмотки, приводящие к корректной геометрии (под корректной геометрией понимается геометрия катушки, при которой не будет пересечения сечений катушек между собой в трёхмерном декартовом пространстве):

– $b_з \geq 1$ мм (величина зазора между катушками не менее 1 мм);

– $R'_1 \geq 0{,}5$ мм (минимальный радиус шаблона для намотки катушки не менее 0,5 мм);

– угол раствора шаблона катушки должен находиться в пределах:

$$0° \leq \gamma \leq \frac{360°}{p \cdot m \cdot q}. \quad (3)$$

Минимальное значение радиуса R_3 (радиус, на котором расположен центр минимального радиуса катушки R_1):

$$R_3 = \frac{R'_1 + b_{кат} + 0{,}5 \cdot b_з}{\sin\left(\frac{360°}{Z}\right)}. \quad (4)$$

При этом максимальное значение радиуса R_3 ограничивается условиями:

$$R_3 = \begin{cases} 0{,}5 \cdot D_{ср}, \text{ если нет ограничения} \\ \text{на охват магнитом} \\ \dfrac{0{,}5 \cdot \left(D_{ср} - l_\delta\right) - 0{,}5 \cdot b_з - b_{кат}}{1 - \sin\left(\frac{360°}{Z}\right)}, \text{ при наличии} \\ \text{ограничения на охват магнитом} \end{cases} \quad (5)$$

Минимальное значение радиуса R_3:

– при $R_1 = R_2$ и $h_{12} \to 0$ получаем круглую форму катушки;

– при $\gamma \to \frac{360°}{p \cdot m \cdot q}$ форма катушки преобразуется в треугольную.

Внешний вид трехфазной катушечной обмотки на 6 и 12 катушек соответственно представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

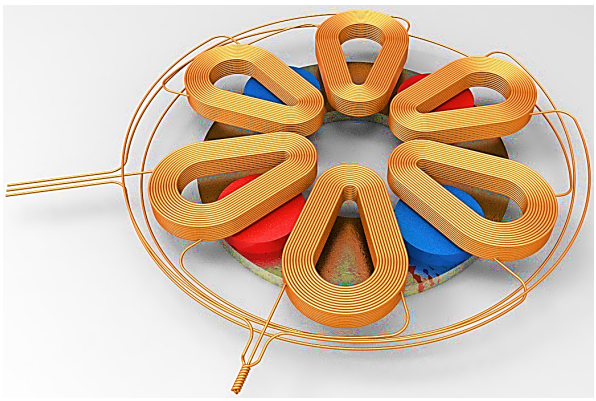


Рис. 7. Внешний вид трёхфазной катушечной обмотки на 6 катушек

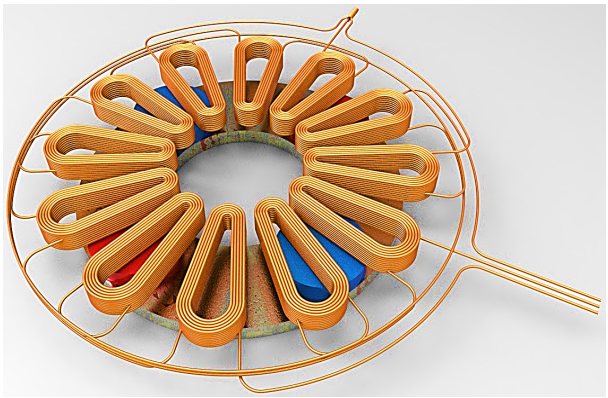


Рис. 8. Внешний вид трёхфазной катушечной обмотки на 12 катушек

Однослойная двухплоскостная обмотка

Рассмотрим еще один тип обмоток, который может быть актуален для дисковых генераторов – это *однослойная двухплоскостная обмотка*. Фазы обмотки данного типа собираются из катушек разных размеров, которые изготавливаются путем намотки на шаблон, а затем производится укладка обмотки и формовка лобовых частей. Типовая схема обмотки представлена на рис. 9. При такой схеме обмотки катушечная группа полностью располагается над полюсом.

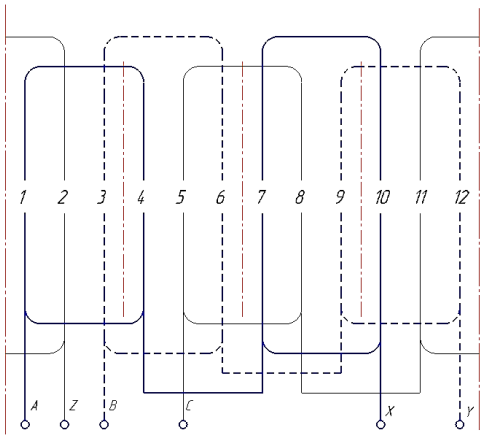


Рис. 9. Схема трёхфазной шаблонной двухплоскостной обмотки

Для дисковых машин, формы катушек в катушечных группах однослойной двухплоскостной обмотки могут быть самыми разными: треугольной, трапециевидной, круглой, ромбической и т.п. Рассмотрим трапециевидную форму катушки (на рис. 10). При такой форме катушки полностью охватывают магнит, что позволяет использовать максимальную величи-

ну потока, создаваемого полюсом. При этом катушка содержит две лобовые части: маленькую, размещённую со стороны меньшего диаметра диска генератора, и большую – со стороны большего диаметра диска. Длины средних линий в лобовых частях обозначим l_1 и l_2 соответственно.

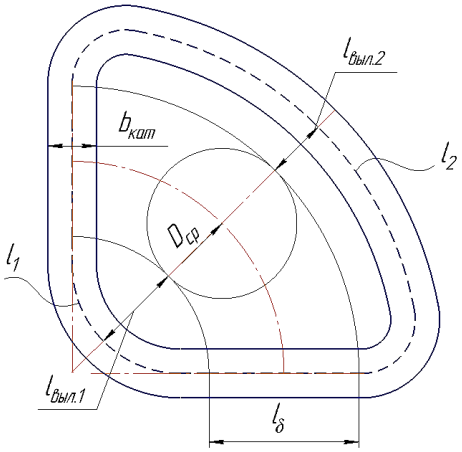


Рис. 10. Размеры катушки трапециевидной формы

Внешний вид рассматриваемой обмотки представлен на рис. 11.

Для определения активного сопротивления катушки такой формы необходимо рассчитать длину средней линии катушки.

$$l = 2 \cdot l_\delta + l_1 + l_2 . \qquad (6)$$

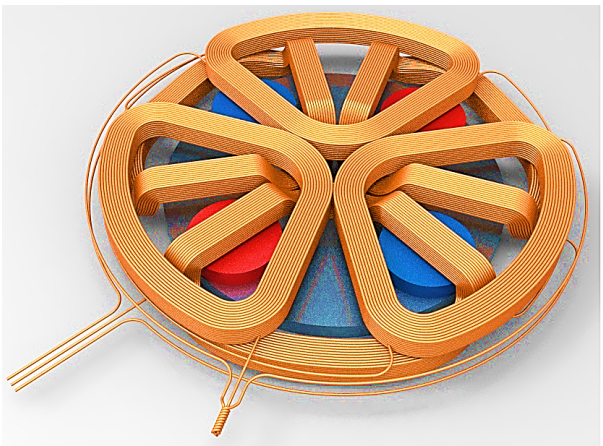


Рис. 11. Внешний вид трёхфазной однослойной двухплоскостной обмотки

Меньший вылет лобовой части является дугой окружности, в этом случае длины лобовых частей l_1 и l_2 определяются по следующим выражениям:

$$\begin{cases} l_1 = \dfrac{\pi \cdot (p-1) \cdot 180\,^\circ}{p} \cdot \left(\dfrac{D_{ср} - l_\delta}{2} \right) \cdot tg\left(\dfrac{\pi}{p} \right) \\ l_2 = 2 \cdot \left(\dfrac{D_{ср} + l_\delta}{2} + l_{выл.2} \right) \cdot tg\left(\dfrac{\pi}{2p} \right) + \\ + 2 \cdot \left(\dfrac{\dfrac{D_{ср} + l_\delta}{2} + l_{выл.2}}{\cos\left(\dfrac{\pi}{2p} \right)} - \dfrac{D_{ср} + l_\delta}{2} \right) \end{cases} \qquad (7)$$

После преобразования формула (7) примет вид:

$$\begin{cases} l_1 = \dfrac{\pi \cdot (p-1) \cdot 180^\circ}{p} \cdot \left(\dfrac{D_{ср} - l_\delta}{2} \right) \cdot tg\left(\dfrac{\pi}{p} \right) \\ l_2 = \left(D_{ср} + l_\delta + 2 \cdot l_{выл.2} \right) \cdot \left(tg\left(\dfrac{\pi}{2p} \right) + \dfrac{1}{\cos\left(\dfrac{\pi}{2p} \right)} \right) - \\ - \left(D_{ср} + l_\delta \right) \end{cases} \qquad (8)$$

Активное сопротивление катушки можно определить:

$$R = \rho \cdot \frac{\left(2 \cdot l_\delta + l_1 + l_2 \right) \cdot w}{q}; \qquad (9)$$

где w – число витков в катушке;

q – сечение проводника катушки;

ρ – удельное сопротивление меди проводника.

У данной формы катушек есть и недостаток – ограничения, накладываемые на геометрические размеры генератора. Так, для расположения лобовых частей на внутреннем диаметре могут возникать сложности с их размещением, а именно отсутствие места под лобовые части катушки, в таком случае приходится увеличивать внутренний диаметр магнитопровода. Рассмотрим подробнее этот случай (рис. 12).

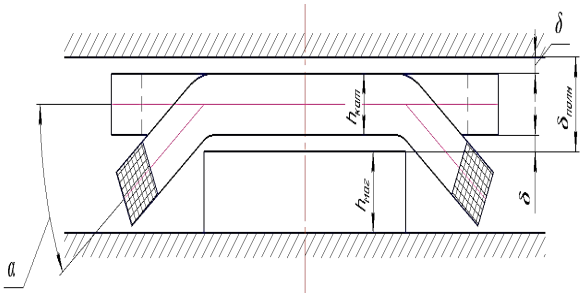


Рис. 12. Схема отгиба лобовых частей в двухплоскостных обмотках

Лобовые части ограничены площадью S_1 (рис. 13), в связи с чем площадь поперечного сечения катушки S_2 не может быть больше площади S_1.

Площади определяются:

$$\begin{cases} S_1 = \left(h_{маг} - \delta_{из}\right) \cdot \left(l_{выл.1} + \dfrac{b_{кат}}{2}\right) \\ S_2 = h_{кат} \cdot b_{кат} \end{cases} \quad (10)$$

При этом следует учитывать, что при отгибе лобовая часть описывает дугу. В этом случае площадь размещения сечения катушки S_1 уменьшается, ограниченная этой дугой (рис. 14). В этом случае расчёт площади S1 затрудняется сложностью выводимых формул.

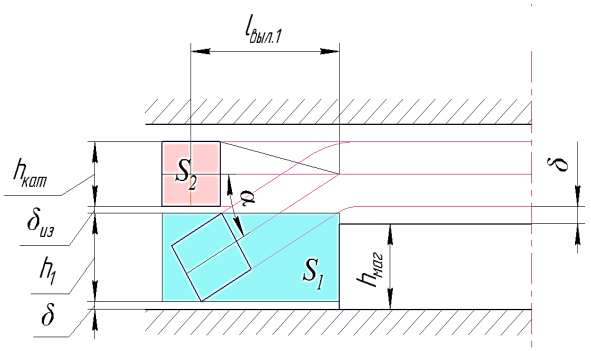


Рис. 13. Положение отогнутой лобовой части

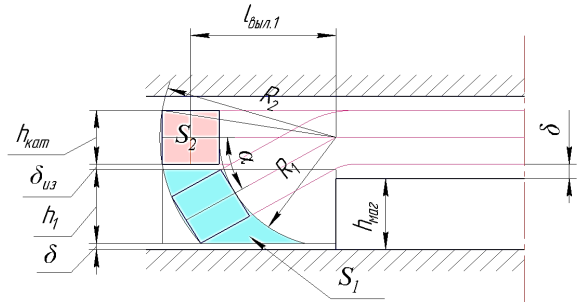


Рис. 14. Учёт радиуса изгиба лобовой части на площадь под неё

При этом существует возможность учесть размещение отгиба лобовых частей на основании проекций сторон сечения катушки при повороте её на угол α. Определим максимальный угол α, на который можно повернуть лобовую часть катушки (рис. 15).

Угол поворота α можно определить:

$$\alpha = 90° - \gamma 1 - \gamma 2 . \quad (11)$$

Углы γ1 и γ2 определим из прямоугольных треугольников (рис. 15, а)

$$\begin{cases} \gamma_1 = arctg\left(\dfrac{b_{кат}}{b_{кат} + 2 \cdot l_{выл.1}}\right) \\ \gamma_2 = \arccos\left(\dfrac{2 \cdot h_2 \cdot \sin(\gamma_1)}{b_{кат}}\right) \end{cases} . \quad (12)$$

Вычислим размер h_2, показывающий катет прямоугольного треугольника.

$$h_2 = h_{маг} + \frac{h_{кат}}{2} . \quad (13)$$

Тогда

$$\begin{cases} \gamma_1 = arctg\left(\dfrac{b_{кат}}{b_{кат} + 2 \cdot l_{выл.1}}\right) \\ \gamma_2 = \arccos\left(\dfrac{\left(2 \cdot h_{маг} + h_{кат}\right) \cdot \sin(\gamma_1)}{b_{кат}}\right) \end{cases} \quad (14)$$

Определим расстояние h_1 – показывающее высоту сечения катушки при её отгибе на угол α. Этот размер состоит из двух слагаемых:

$$h_1 = x_1 + x_2 . \quad (15)$$

Определим слагаемые:

$$\begin{cases} x_1 = h_{кат} \cdot \cos(\alpha) \\ x_2 = b_{кат} \cdot \sin(\alpha) \end{cases} . \quad (16)$$

Таким образом, формула определения высоты, занимаемой сечением катушки при повороте на угол α:

$$h_1 = h_{кат} \cdot \cos(\alpha) + b_{кат} \cdot \sin(\alpha) . \quad (17)$$

Следует отметить, что размер h_1 должен удовлетворять условию:

$$h_1 \geq h_3 . \qquad (18)$$

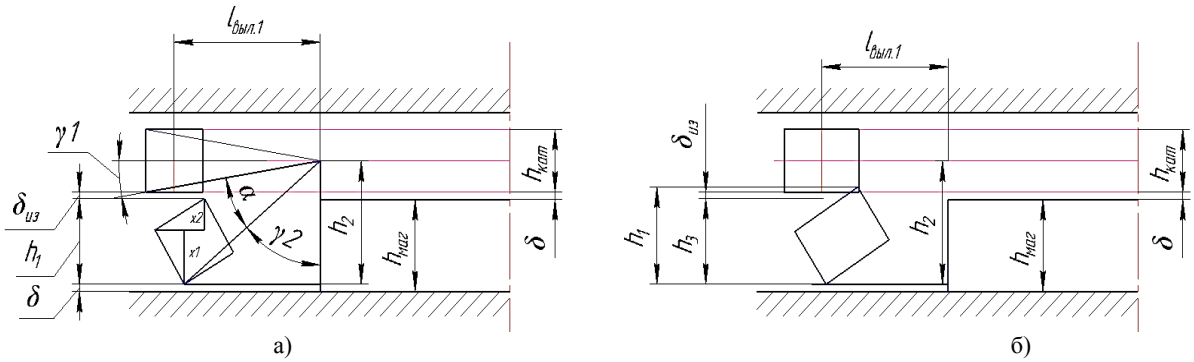


Рис. 15. Эскизы к определению положения лобовых частей

При этом размер h_3 определяет доступную под катушку высоту площади S_1:

$$h_3 = h_{маг} - \delta_{из} ; \qquad (19)$$

где $\delta_{из}$ – толщина изоляционной прокладки между слоями лобовых частей.

Определим, каким внутренним диаметром магнитопровода должна обладать геометрия генератора для гарантированного размещения отгиба лобовых частей. Из анализа данных, представленных на рис. 10, известно, что размер вылета внутренней лобовой части ($l_{вып.1}$) может изменяться в следующих пределах:

$$b_{кат} \leq l_{вып.1} \leq \frac{\left(D_{ср} - l_{\delta} - b_{кат}\right)}{2} . \qquad (20)$$

В случае, если условия (18) и (20) не выполняются, то необходимо пересмотреть начальные параметры геометрии: высоту магнита ($h_{маг}$) и геометрические размеры сечения катушки ($b_{кат}$, $h_{кат}$).

Минимальный размер вылета лобовой будет при условии, что угол отгиба составит 90 градусов (рис. 16), в этом случае:

$$l_{вып.\min} = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{h_{кат}}{2} + b_2 \right) + \frac{b_{кат}}{2} , \qquad (21)$$

при этом следует учитывать, что $b_2 \rightarrow \delta$.

Формула (21) не учитывает изменение длины лобовой катушки (стержня), за счёт нелинейных эффектов растяжения-сжатия материала.

Для внешнего радиуса все расчеты, касающиеся изгиба лобовой части, проводятся аналогично.

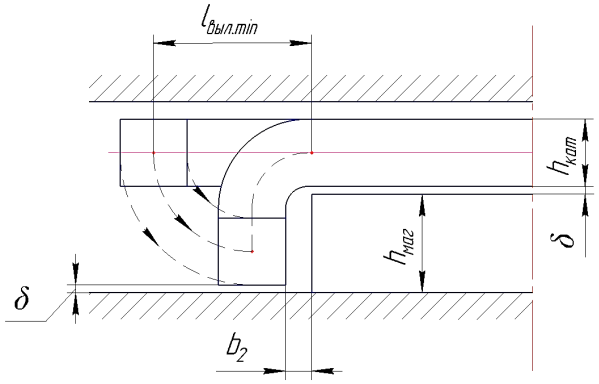


Рис. 16. Минимальная длина вылета лобовой части при максимальном изгибе

Двухслойная петлевая обмотка

Еще один тип обмотки, который потенциально может быть использован в генераторах дискового типа – это *обмотка двухслойная петлевая*, типовая схема обмотки представлена на рис. 17. При такой схеме обмотки, катушечная группа полностью располагается над полюсом.

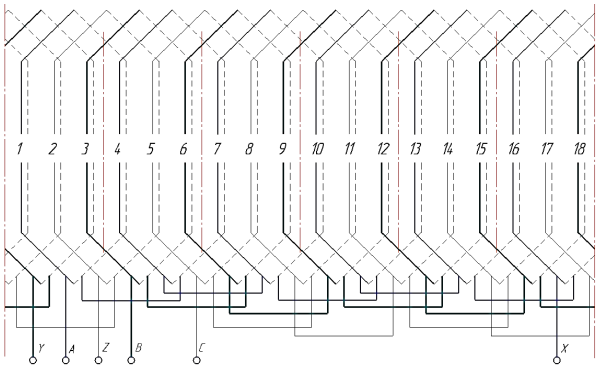


Рис. 17. Схема трёхфазной двухслойной петлевой обмотки

Так же как и для однослойных, катушки двухслойных обмоток могут иметь разную форму: треугольную, трапециевидную, круглую, ромбическую. Рассмотрим ромбовидную форму катушки (рис. 18). При такой форме катушка «разделяется» на две части, каждая из которых лежит в своём слое, при этом «охват» магнита катушкой регулируется шагом обмотки, что позволяет использовать максимальную величину потока, создаваемого полюсом. Катушка содержит две лобовые части: одну, размещённую со стороны меньшего диаметра диска генератора, и вторую – со стороны большего диаметра диска. Длины средних линий в лобовых частях обозначим l_1 и l_2 соответственно.

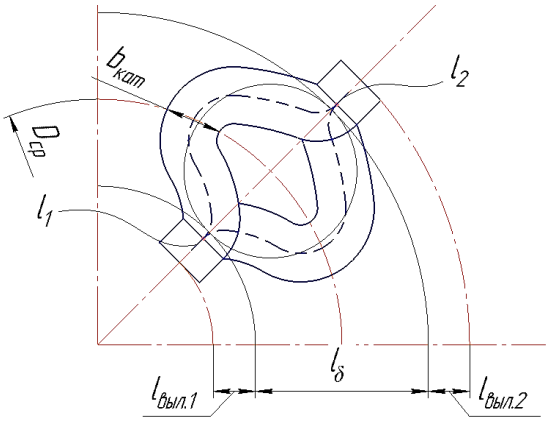


Рис. 18. Вид сверху катушки двухслойной обмотки

Внешний вид трехфазной двухслойной обмотки изображен на рис. 19.

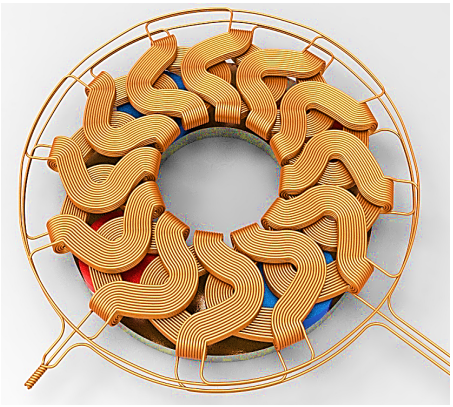


Рис. 19. Внешний вид трёхфазной двухслойной петлевой обмотки

Для определения активного сопротивления катушки такой формы необходимо рассчитать длину средней линии катушки:

$$l = 2 \cdot l_\delta + l_1 + l_2 . \qquad (22)$$

В таком случае длины лобовых частей l_1 и l_2 определяются по следующим выражениям (вывод на основе теоремы косинусов):

$$\begin{cases} l_1 = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D_{ср} - l_\delta}{2} - l_{выл.1}\right)^2 + \left(\frac{D_{ср} - l_\delta}{2}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{D_{ср} - l_\delta}{2} - l_{выл.1}\right) \cdot \left(\frac{D_{ср} - l_\delta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2p}\right)} \\ l_2 = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D_{ср} + l_\delta}{2} + l_{выл.2}\right)^2 + \left(\frac{D_{ср} + l_\delta}{2}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{D_{ср} + l_\delta}{2} + l_{выл.2}\right) \cdot \left(\frac{D_{ср} + l_\delta}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2p}\right)} \end{cases} \qquad (23)$$

Активное сопротивление катушки будет определяться:

$$R = \rho \cdot \frac{(2 \cdot l_\delta + l_1 + l_2) \cdot w}{q}; \qquad (24)$$

где w – число витков в катушке;

q – сечение проводника катушки;

ρ – удельное сопротивление меди проводника.

Такая обмотка может быть размещена на любом диаметре, при этом имеется сложность придания формы катушки.

Анализ эффективности обмоток дискового генератора

Для анализа эффективности рассмотренных обмоток синхронного дискового генератора были использованы методы теории поля, получившие реализацию во многих пакетах прикладных программ инженерных расчётов. В этих программах происходит расчёт поля электрической машины методом конечных элементов. Этот метод позволяет с высокой точностью описывать поведение поля. Поэтому математический эксперимент, проведённый с использованием компьютерного моделирования электромагнитного поля методом конечных элементов, является достаточным для получения качественных научных результатов.

В результате компьютерного моделирования однослойной катушечной обмотки получены кривые ЭДС для каждой из форм катушек.

Кривые ЭДС для круглых катушек представлены на рис. 20; для грушевидных на рис. 21; для треугольных на рис. 22.

На основании вышеприведённых графиков рассчитаны действующие значение ЭДС, которые представлены в табл. 1. Результаты разложения кривой ЭДС на гармонический спектр представлены в табл. 2.

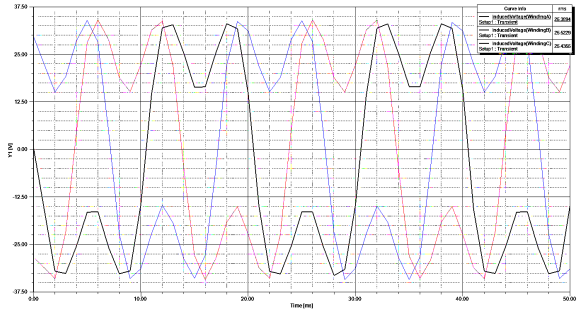


Рис. 20. Кривые ЭДС обмотки круглых катушек

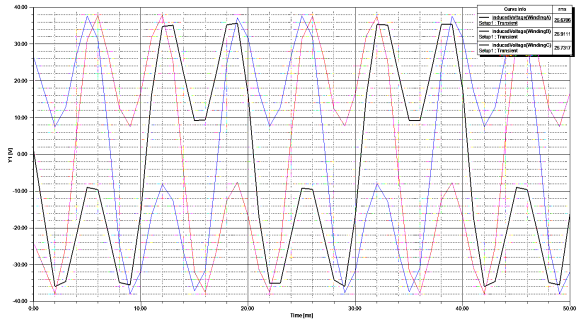


Рис. 21. Кривые ЭДС обмотки из грушевидных катушек

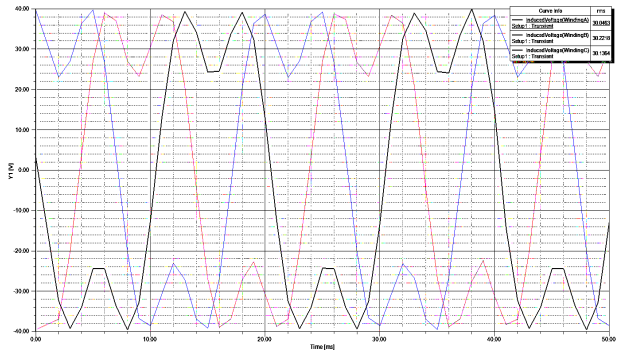


Рис. 22. Кривые ЭДС обмотки из треугольных катушек

Таблица 1

Форма катушки	Действующее значение ЭДС, В
круглая	25,4
грушевидная	25,75
треугольная	30,1

Таблица 2

№ гармоник	Форма катушки		
	Круглая	Грушевидная	Треугольная
1	31,54	28,72	39,52
2	0,04	0,14	0,05
3	17,10	22,08	15,44
4	0,04	0,18	0,08
5	1,28	1,21	1,02
6	0,08	0,05	0,07
7	1,01	0,74	0,42
8	0,03	0,16	0,13
9	0,17	0,34	0,08
10	0,00	0,16	0,05

Разложение в ряд Фурье показывает наличие 3 и 5 гармонических составляющих в кривой ЭДС, при этом третья гармоника вносит сильнейшие искажения в форму кривой. Это негативно сказывается на действующее значение ЭДС обмотки.

В результате компьютерного моделирования однослойной концентрической двухплоскостной обмотки получена кривая ЭДС, представленная на рис. 23.

На основании кривой (рис. 23) было определено действующее значение ЭДС, которое составило 46,7 В.

Результат разложения кривой ЭДС в ряд Фурье представлен в табл. 3

Разложение в ряд Фурье показывает наличие 3, 5, 7 гармонических составляющих в кривой ЭДС, при этом третья гармоника вносит сильнейшие искажения в форму кривой, что негативно сказывается на действующее значение ЭДС обмотки. Отдельно следует отметить высокое значение амплитуды первой гармоники кривой ЭДС.

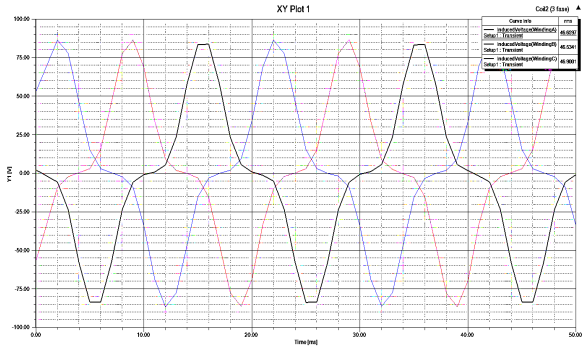


Рис. 23. Кривые ЭДС обмотки круглых катушек

В результате компьютерного моделирования двухслойной петлевой обмотки получены кривые ЭДС для различных укорочений обмотки.

Кривые ЭДС для различных укорочений обмотки представлены на рис. 24.

Таблица 3

№ гармоник	Величина ЭДС, В
1	61,35
2	0,07
3	24,29
4	0,10
5	2,52
6	0,18
7	1,14
8	0,14
9	0,15
10	0,13

На основании графиков (рис. 24) рассчитаны действующие значения ЭДС, которые представлены в табл. 4

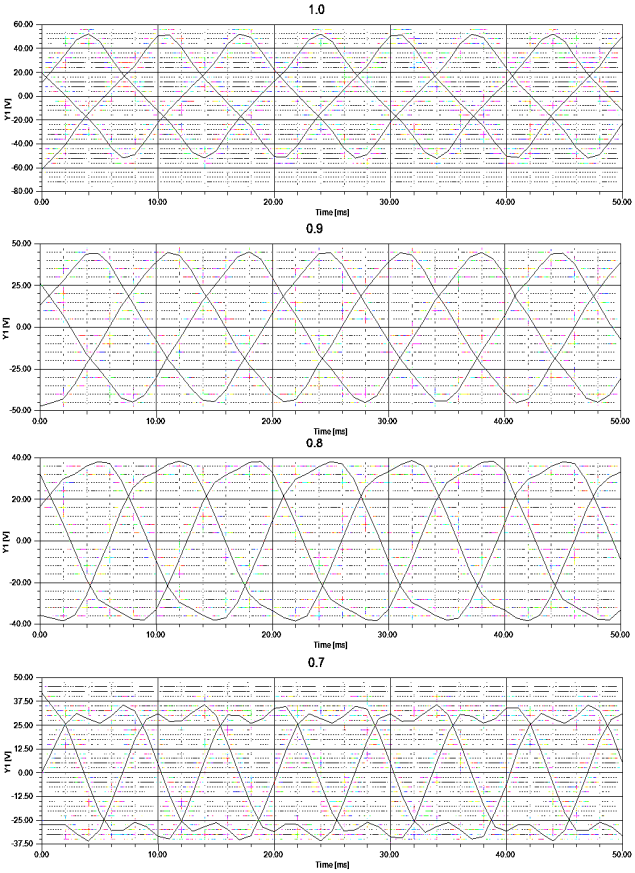


Рис. 24. Кривые ЭДС с различными укорочениями обмотки

Таблица 4

Укорочение обмотки	Действующее значение ЭДС, В
1	32,0
0,9	29,5
0,8	27,9
0,7	26,3

Результаты разложения кривых ЭДС двухслойных обмоток с различными укорочениями представлены в табл. 5.

Таблица 5

№ гармоник	Укорочение			
	1,0	0,9	0,8	0,7
1	44,767	41,742	39,402	36,207
2	0,037	0,017	0,058	0,029
3	6,438	2,746	3,301	8,433
4	0,088	0,076	0,091	0,080
5	1,384	1,090	0,982	1,539
6	0,066	0,086	0,059	0,057
7	0,354	0,367	0,279	0,325
8	0,066	0,165	0,045	0,142
9	0,081	0,252	0,232	0,280
10	0,049	0,177	0,096	0,137

Разложение в ряд Фурье показывает наличие 3 и 5 гармонических составляющих в кривой ЭДС, при этом влияние третьей гармоники, по сравнению с ранее рассмотренными схемами обмотки – гораздо меньше.

Выводы

1. Максимальное действующее значение ЭДС равное 46,7 В наблюдается при использовании в генераторе однослойной концентрической двухплоскостной обмотки. При этом в кривой ЭДС явно выражено присутствие третьей гармоники.

2. Хороший показатель преобразования энергии и кривой ЭДС с минимальным составом высших гармонических наблюдается при использовании двухслойных обмоток. При этом двухслойная обмотка без укорочения даёт максимальное действующее значение ЭДС.

3. Наихудшие результаты по форме кривой и действующему значению ЭДС показывают катушечные обмотки. При этом лучшие результаты показывает обмотка с треугольной формой катушек.

Литература

1. Черных Т.Е., Белозоров С.А., Тикунов А.В. Моделирование синхронного генератора прямого привода для вертикально-осевой ветроэнергетической установки // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. № 4. С. 34-37.

2. Пат. 111365 Российская Федерация, МПК H02Л21/24. Электрогенератор / Писаревский Ю.В., Беляков П.Ю., Писаревский А.Ю., Тикунов А.В., Черных Т. Е. № 2011133630/07; заявл. 10.08.2011; опубл. 10.12.2011.

3. Исследование торцевого синхронного генератора прямого привода для вертикально-осевой ветроэнергетической установки / Т.Е. Черных, А.С. Павлов, П.Ю. Беляков, Ю.В. Писаревский, А.В. Тикунов // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 2. С. 11–16.

4. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM. М.: Академия, 2005. 336 с.

5. Жерве Г.К. Обмотки электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 400 с.: ил.

6. Зимин В.И., Каплан М.Я., Палей А.М. Обмотки электрических машин. Л.: Энергия, 1970. 472 с.

Поступила 10.09.2018; принята к публикации 11.10.2018

Информация об авторах

Черных Татьяна Евгеньевна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tany_ch@list.ru
Белозоров Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент, Международный институт компьютерных технологий (394026, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 "Б"), e-mail: belozorov_SA@mail.ru
Тикунов Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tikunov_av@bk.ru

SELECTING WINDINGS OF DISK SYNCHRONOUS GENERATOR WITH EXCITATION FROM PERMANENT MAGNETS

T.E. Chernykh[1], S.A. Belozorov[2], A.V. Tikunov[1]

[1]Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
[2]International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: modernization of the already existing, as well as the development of new electrical equipment has always been an urgent task. In the last decade, this issue has become even more important due to the need to develop energy-saving technologies in the power industry and introduce new technologies for producing electrical energy, which include alternative renewable energy sources, in particular wind power. There are quite a lot of problems in the Russian wind power industry related to the fact that this direction in our country did not develop for a long time, and therefore there are almost no modern design solutions for both wind power plants and its individual nodes that meet today's needs. In particular, in Russian installations, developers most often use foreign-made electric generators or a general-purpose electrical machine. However, to obtain high energy performance of a wind power installation, it is advisable to use a specialized generator that meets a number of requirements. In this connection, the design of a specialized synchronous generator with excitation from permanent magnets is proposed for a vertical-axial wind power installation that meets these requirements, and also offers various options for winding execution

Key words: synchronous generator, permanent magnets, winding scheme, coil form

References

1. Chernykh T.E., Belozorov S.A., Tikunov A.V. “Simulation of a direct drive synchronous generator for a vertical-axial wind power installation”, *Electrotechnical complexes and control systems (Elektrotekhnicheskie kompleksy i sistemy upravleniya)*, 2015, no. 4, pp. 34-37.

2. Pisarevskiy Yu.V., Belyakov P.Yu., Pisarevskiy A.Yu., Tikunov A.V., Chernykh T.E. Patent 111365 of Russian Federation “IPC H02L21 / 24. Electric generator”, 2011

3. Chernykh T.E., Pavlov A.S., Belyakov P.Yu., Pisarevskiy Yu.V., Tikunov A.V. “Study of the face synchronous generator direct drive for a vertical-axial wind power installation”, *Electrotechnical complexes and the systems of management (Elektrotekhnicheskie kompleksy i sistemy upravleniya)*, 2012, no. 2, pp. 11-16

4. Boole O.B. “Methods of calculation of magnetic systems of electric devices. Magnetic chains, fields and the FEMM” (“Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Magnitnyye tsepi, polya i programma FEMM”), Moscow, Akademiya, 2005, 336 p.

5. Gervais G.C. “Windings of electric cars” (“Obmotki elektricheskikh mashin”), Leningrad, Energoatomizdat, 1989, 400 p.

6. Zimin V.I., Kaplan M.Ya., Paley A.M. “Windings of electric cars” (“Obmotki elektricheskikh mashin”), Leningrad, Energiya, 1970, 472 p.

Submitted 10.09.2018; revised 11.10.2018

Information about the authors

Tat’yana E. Chernykh, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tany_ch@list.ru
Sergey A. Belozorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, International Institute of Computer Technologies (29 "B" Solnechnaya st., Voronezh 394026, Russia), e-mail: belozorov_SA@mail.ru
Aleksey V. Tikunov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tikunov_av@bk.ru

Радиотехника и связь

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОМПОНОВКИ БЛОКОВ РЭС С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

М.А. Ромащенко, А.П. Стрельцов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается комплексный подход к процессу компоновки блоков и ячеек радиоэлектронных средств с учетом электромагнитных и тепловых характеристик. Обосновывается актуальность задачи создания и последующего совершенствования методик оптимальной компоновки различных иерархических уровней конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитных и тепловых характеристик. Постоянный рост сложности и плотности компоновки приводит к увеличению требований к квалификации разработчиков, росту затрат на проектирование и тестирование радиоэлектронных средств, замедлению процесса создания перспективных устройств, разработке специальных средств теплозащиты и созданию методик обеспечения электромагнитной совместимости и помехоустойчивости блоков радиоэлектронных средств. Предлагается методика оптимальной компоновки конструкции радиоэлектронных средств, основанной на использовании 3D-моделей, адаптированных для прикладного применения. Особенностью методики является применение математического обеспечения, позволяющего проводить многократный итерационный анализ за приемлемое время. Методика включает в себя процедуры первоначальной компоновки и оптимизации конструкции блока устройства, создание 3D-модели и её адаптации для проведения дальнейшего анализа. Представлено практическое применение методики для решения производственной задачи, показавшее качественные улучшения технико-эксплуатационных параметров изделия — температуру наиболее теплонагруженного элемента, максимальную температуру внутри корпуса, напряженность электромагнитного и электрического полей и помехоустойчивость конструкции

Ключевые слова: компоновка блока, электромагнитный анализ, моделирование теплового режима, оптимизация конструкции устройства

Введение

В современных производственных условиях системы компьютерного моделирования являются основным инструментом разработчиков радио-электронных устройств (РЭС). А именно, уже весь процесс разработки современных РЭС ведется в специализированных системах автоматизированного проектирования (САПР). Однако постоянный рост сложности и плотности компоновки приводит к увеличению требований к квалификации разработчиков, росту затрат на проектирование и тестирование РЭС, замедлению процесса создания перспективных устройств. Разработка специальных средств теплозащиты и создание методик обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) и помехоустойчивости (ПУ) блоков РЭС, размещенных в изолированном пространстве, создание новых типов систем охлаждения (СО), отвечающих специфическим требованиям, улучшение их энергетических и технико-экономических показателей является важной задачей [1]. Функционирование, надежность и управление находящихся в непосредственной близости устройств существенно зависит от эффективности систем обеспечения температурных режимов и их работы. Как правило, работа таких приборов и устройств связана с необходимостью отвода больших плотностей тепловых потоков [2].

Принято выделять следующие уровни ЭМС: межсистемный, внутрисистемный и внутриаппаратурный. И если по первым двум уровням имеется достаточно большое количество научных и прикладных работ, позволяющих эффективно решать возникающие задачи, то внутриаппаратурная ЭМС и ПУ - эта та область, которой до настоящего времени практически не уделялось должного внимания. И как следствие, в сложившихся производственных процессах данным вопросам обеспечения требований по ЭМС и ПУ при разработке РЭС отводилась второстепенная роль. Но в настоящий момент достигнута та граница, когда дальнейшее повышение эффективности разработки РЭС

© Ромащенко М.А., Стрельцов А.П., 2018

возможно только с учетом принятия во внимание требований ЭМС и ПУ и решением задач по их обеспечению [3].

Таким образом, возникает актуальная задача создания и последующего совершенствования методик оптимальной компоновки ячеек и блоков РЭС с учетом электромагнитных и тепловых характеристик, адаптированных к имеющимся производственным условиям.

Описание методики

Для оптимальной компоновки блоков радиоэлектронных средств с учетом электромагнитных и тепловых характеристик была разработана методика, структура которой представлена на рис. 1.

Предлагаемая методика включает в себя следующую последовательность действий:

1. Производится анализ исходных данных и требований, предъявляемых к конечной конструкции.
2. Создаются все необходимые 3D-модели.
3. Производится первоначальная компоновка блока с учетом требований и ограничений по части ТЗ, ЭМС и теплового режима.
4. На данном этапе требуется адаптировать 3D-модели для дальнейшего анализа теплового режима.
5. Требуется произвести моделирование теплового режима блока.
6. На данном этапе происходит выбор, основанный на полученном ранее результате анализа, необходимости применения системы охлаждения.
7. При необходимости применения системы охлаждения происходит её выбор.
8. Производится расчет теплового режима при помощи специализированного САПР с учетом используемой системы охлаждения.
9. После проведения моделирования и при результатах, удовлетворяющих требованию к тепловому режиму, следует перейти к одиннадцатому пункту.
10. При результатах, не удовлетворяющих требований по тепловому режиму, решается, поможет выбор другой системы охлаждения или требуется перекомпоновать блок и входящие в него сборочные единицы.
11. На данном этапе требуется адаптировать 3D-модели к анализу электромагнитной обстановки.
12. Производится анализ ЭМС блока.
13. Следует сделать выбор, основываясь на полученном результате анализа, требуется установка экрана или нет.
14. На данном этапе требуется выбрать экран(ы), если это требуется по результатам первичного моделирования.
15. Производится анализ ЭМС с установленным экраном.
16. После проведения анализа и при результатах, удовлетворяющих требованию к электромагнитной совместимости, следует перейти к восемнадцатому пункту.
17. При результатах, не удовлетворяющих требований по электромагнитной совместимости, следует решить, поможет выбор другого экрана или требуется перекомпоновать блок и входящие в него сборочные единицы.
18. Если были внесены изменения в конструкцию блока, то следует провести заключительный анализ, чтобы удостовериться в выполнении технического задания в области температурного режима и электромагнитной совместимости. При отсутствии вносимых изменений в данной итерации алгоритм будет считаться завершенным.

На рис. 2 представлена процедура создания 3D-модели. Для создания модели требуется:

1. Получить 3D-модель платы от конструктора, разрабатывавшего её.
2. Создать корпус с размерами, соответствующими сопрягаемым деталям и сборочным изделиям и требованиям ТЗ.
3. Создать крепежные отверстия и посадочные места под элементы.
4. Создать ответную часть корпуса (крышку) и все вспомогательные детали.

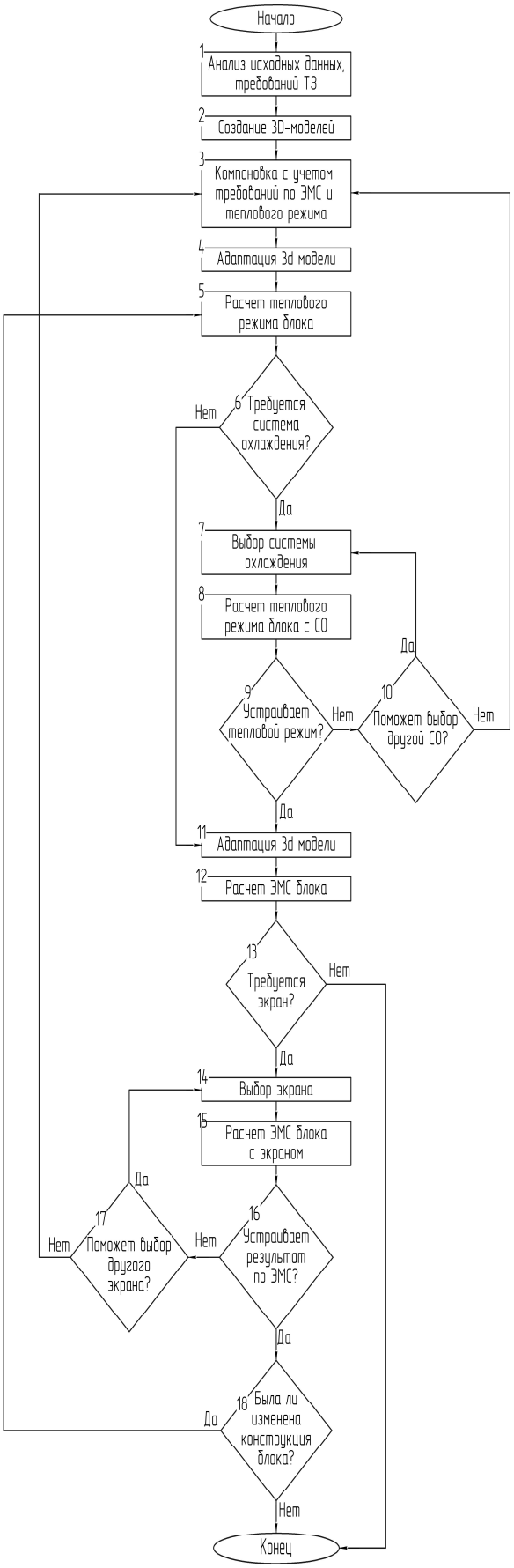


Рис. 1. Алгоритм компоновки блока РЭС с учетом электромагнитных и тепловых характеристик

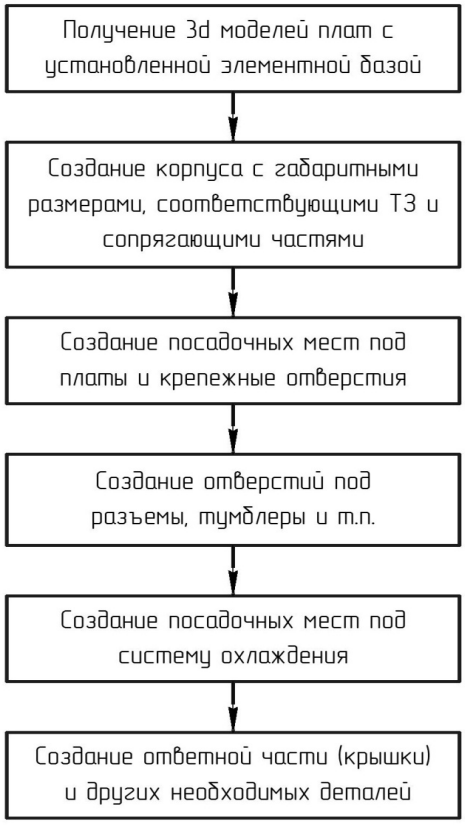


Рис. 2. Процедура создания 3D-модели блока

На рис. 3 изображена процедура предварительной компоновки блока РЭС. На этом этапе выполняют компоновку блока с учетом требования и ограничений в ТЗ по части ЭМС и теплового режима, с последующей корректировкой, при необходимости, деталей из-за изменений установочных и габаритных размеров.

При расположении компонентов необходимо опираться на следующее:

1. Компоненты, требующие особых мест размещения, например, органы управления, должны быть строго привязаны к заданным местам.

2. Устанавливать рядом элементы, имеющие большое число взаимных связей.

3. Теплонагруженные элементы располагать ближе к системам охлаждения и подальше от теплочувствительных элементов.

4. Помехочувствительные компоненты не размещать рядом с компонентами, которые могут быть источниками помех.

Рис. 3. Процедура компоновки блока РЭС

Отличительной особенностью анализа процессов теплообмена, осуществляемого при проектировании, является необходимость рассмотрения процесса одной и той же физической природы для всего устройства или комплекса. Полная математическая модель теплового режима устройства записывается в виде системы многомерных нестационарных уравнений теплопроводности для твердых тел (1) и уравнений энергии для потоков теплоносителей (2) с граничными условиями 1, 2, 3-го родов либо с условиями сопряжения на границах раздела элементов.

$$c_i \rho_i \frac{\delta T_i}{\delta \tau} = \nabla(\lambda_i \nabla T_i) + q_{vi}, \qquad (1)$$

где i = 1, … , I; I – число тел; T_i – температуры твердых тел; τ – время;

c_i – удельные теплоемкости тел; ρ_i – плотности твердых тел; q_{vi} – объемные плотности теплового потока.

$$c_i \rho_i \left(\frac{\delta U_l}{\delta \tau} + \vec{v} \nabla U_l\right) = \nabla(\lambda_i \nabla U_l), \qquad (2)$$

где l = 1, … , L; U_i – температуры теплоносителей; υ – скорость движения теплоносителя; L – число потоков теплоносителей [4].

Математической моделью для электромагнитного анализа можно считать модель излучения тока в дифференциальном режиме.

Для измеряемого расстояния 3 м необходимо, чтобы максимальная длина проводника была не более метра. Предположение о постоянном распределении токов в проводниках является приемлемым приближением при условии, что проводники электрически короткие на интересующей нас частоте. Это значительно упрощает результаты и применяется во многих практических задачах. Например, печатный проводник длиной 0,5 м равен длине волны λ_0 в свободном пространстве на частоте 600 МГц. Этот же проводник на частоте 100 МГц будет в шесть раз короче длины волны, и распределение токов вдоль него является приблизительно постоянным.

Излученные поля могут быть определены, согласно предположению о постоянном распределении токов в проводниках, приняв каждый провод за диполь Герца. В итоге максимальная напряженность электрического поля для дифференциального режима будет определяться

$$\dot{E}_{diff.max} = 1{,}316 \cdot 10^{-14} \frac{f^2 \cdot \dot{I}_{diff} \cdot l \cdot s}{d}, \text{В/м}, \qquad (3)$$

где $\dot{I}_{diff}$ — ток линий передачи в дифференциальном режиме, А; f — частота, которая представляет интерес, Гц; l — длина отрезка линии передачи, м; s — расстояние между проводниками, м; d — расстояние между центром набора проводников и точкой размещения измерительной антенны, м.

Направление вектора напряженности электрического поля будет параллельно проводникам [5].

Практическое применение методики

На основании вышеизложенной методики компоновки блоков РЭС с учетом тепловых и электромагнитных параметров был оптимизирован блок ВЧ-усилителя. Оптимизация блока усилителя проводилась с помощью современного САПР:

1) создание 3d моделей и компоновка блока в Creo Parametric (академическая версия);

2) моделирование тепловых процессов в Autodesk Simulation CFD (студенческая версия);

3) моделирование электромагнитных помех в CST Studio Suiet Student Edition.

Блок входит в состав радиостанции. Изделие предназначено для работы в сооружениях:

– предельная повышенная температура среды — до 30 °С;

– предельная пониженная температура среды — от 5 °С;

– диапазон рабочих частот 3-30 МГц;

– рабочая относительная влажность воздуха — не более 80 % при температуре 25 °С;

Напряжение питания — 12В;

КПД — 0,7.

Блок усилителя мощности (рис. 4) состоит из ячейки усилителя и ячейки фильтрации (представлены на рис. 5).

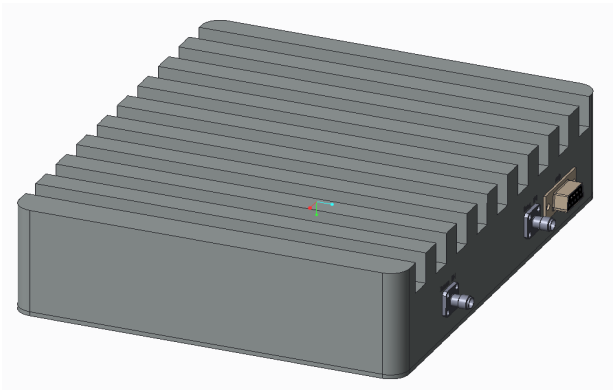


Рис. 4. Внешний вид исследуемого блока

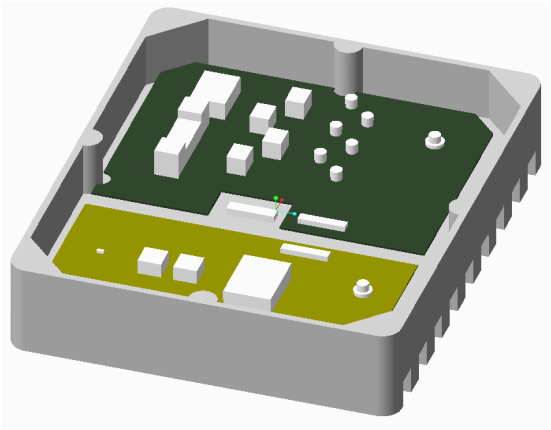


Рис. 5. Адаптированная 3D-модель блока для анализа

Предварительный анализ дал следующие результаты, представленные на рис. 6 и 7.

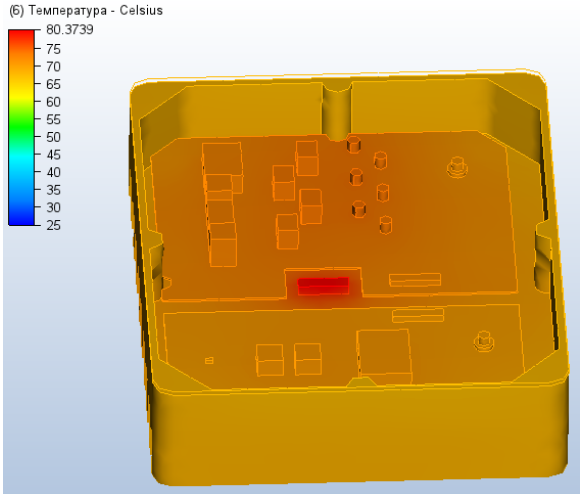


Рис. 6. Результат предварительного анализа теплового режима

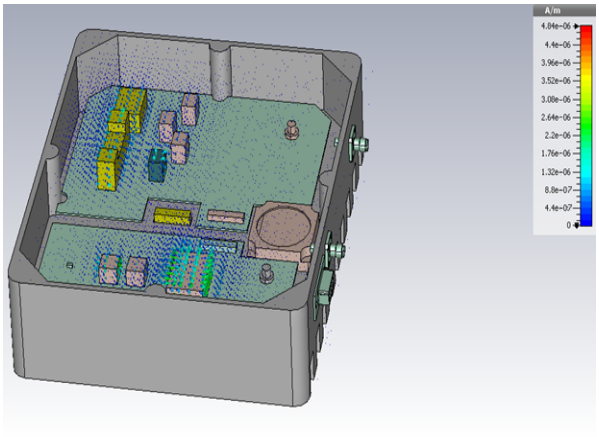


Рис. 7. Результат предварительного анализа напряженности магнитного поля

После выполнения оптимизации при помощи предлагаемой методики компоновки блоков РЭС с учетом электромагнитных и тепловых характеристик были получены результаты, представленные на рис. 8 и 9.

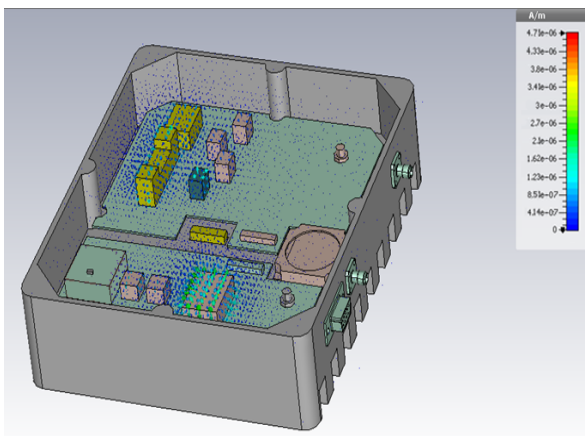


Рис. 8. Полученный результат анализа напряженности магнитного поля

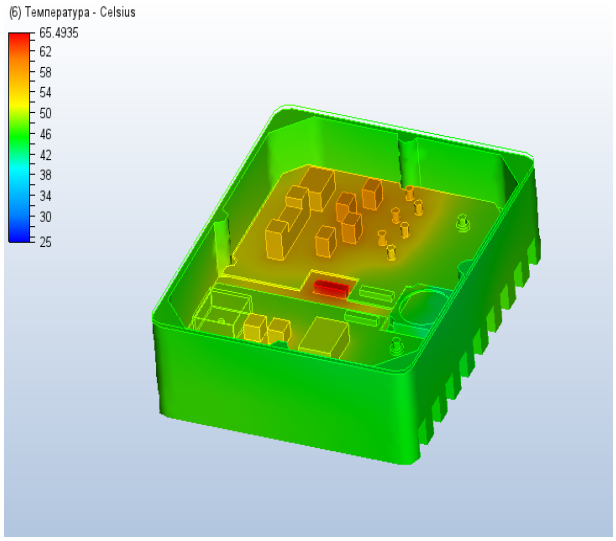


Рис. 9. Результат моделирования теплового режима блока

Выводы

В ходе выполнения работы была предложена методика оптимальной компоновки блоков РЭС с учетом электромагнитных и тепловых характеристик, адаптированная к имеющимся производственным условиям.

Методика включает в себя процедуры первоначальной компоновки и оптимизации конструкции блока, создания 3D-модели и её адаптации для проведения дальнейшего анализа.

Практическое применение методики для оптимизации компоновки ВЧ-усилителя радиостанции позволило получить следующие результаты:

— температура наиболее теплонагруженного элемента была уменьшена на 6% вследствие увеличения глубины посадочного отверстия в корпусе на 1 мм;

— максимальная температура внутри блока была уменьшена на 16% после установки локальной принудительной воздушной системы охлаждения;

— напряженность электрического и магнитного поля на частоте 23 МГц была уменьшена на 3% после оптимизации трассировки платы, в результате которой были уменьшены длины печатных проводников;

— помехоустойчивость конструкции на частоте 27 МГц была увеличена на 10% за счет установки экрана.

Литература

1. Ромащенко М.А., Пряхин А.А. Методика анализа данных сканирования ближнего электромагнитного поля // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 4. С. 82-86.

2. Heise E.R., Heise R.E. Some simple spacecraft considerations // Proc. ofIEEE EMC Symp. 2006. Vol. 1. P. 182–186.

3. Ромащенко М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: дис. … д-ра техн. наук. Воронеж, 2014. 393 с.

4. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.

5. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 616с.

Поступила 13.06.2018; принята к публикации 14.09.2018

Информация об авторах

Ромащенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kiper@vorstu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5629-6056

Стрельцов Андрей Павлович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: andrestreltsov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6780-2943

DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGY FOR THE REDS BLOCK COMPOUNDING TAKING INTO ACCOUNT ELECTROMAGNETIC AND THERMAL CHARACTERISTICS

M.A. Romashchenko, A.P. Strel'tsov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: an integrated approach to the process of assembling blocks and cells of radio electronic equipment is considered, taking into account electromagnetic and thermal characteristics. The urgency of the task of creating and further improving the methods of optimal layout of various hierarchical levels of radio-electronic facilities designs is justified, taking into account electromagnetic and thermal characteristics. The constant increase in complexity and density of the layout leads to an increase in requirements for the qualifications of developers, an increase in the cost of designing and testing radioelectronic devices, slowing down the process of creating promising devices, developing special means of thermal protection and creating techniques to ensure electromagnetic compatibility and noise immunity of radioelectronic units.The technique of optimal layout design of radio-electronic means, based on the use of 3D-models, adapted for application. A feature of the technique is the use of software that allows for repeated iterative analysis in a reasonable time. The methodology includes procedures for the initial layout and optimization of the design of the device unit, the creation of a 3D model and its adaptation for further analysis. The practical application of the technique for solving the production problem is presented, which showed qualitative improvements in the technical and operational parameters of the product - the temperature of the most heat-loaded element, the maximum temperature inside the case, the strength of the electromagnetic and electric fields, and the noise immunity of the structure

Key words: block layout, electromagnetic analysis, thermal simulation, device design optimization

References

1. Romashchenko M.A., Pryakhin A.A. “A technique for analyzing near-electromagnetic field scanning data”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta),* 2017, vol. 13, no. 4, pp. 82-86.

2. Heise E.R., Heise R.E. “Some simple spacecraft considerations”, *Proc. of IEEE EMC Symp*, 2006, vol. 1, pp. 182-186.

3. Romashchenko M.A. “Methods of optimal design of radio electronic devices with regard to electromagnetic compatibility and noise immunity: Dr. of tech. sci. diss.” (“Metody optimal'nogo proektirovaniya konstruktsiy radioelektronnykh sredstv s uchetom elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti: dis. d-ra tekhn. nauk”), VSTU, Voronezh, 2014, 393 p.

4. Dulnev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. “Methods for calculating the thermal conditions of devices” (“Metody rascheta teplovogo rezhima priborov”), Moscow, Radio i Svyaz’, 1990, 312 p.

5. Kechiev L.N. “Designing printed circuit boards for digital high-speed equipment” (“Proektirovanie pechatnykh plat dlya tsifrovoy bystrodeystvuyushchey apparatury”), Moscow, Co Ltd “Gruppa IDT”, 2007, 616 p.

Submitted 13.06.2018; revised 14.09.2018

Information about the authors

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kiper@vorstu.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5629-6056

Andrey P. Strel’tsov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: andrestreltsov@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6780-2943

УДК 621.395.623.8

ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ МАЛОГАБАРИТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

А.С. Бадаев, А.И. Сукачев, В.О. Алексеев, П.А. Кондратов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассчитывается и разрабатывается конструкция высококачественных высокоэффективных малогабаритных акустических систем (АС) для беспроводных систем передачи информации – персональной сети Bluetooth. Показано, что для достижения максимально высоких энергетических характеристик при небольших габаритах оптимальным видом акустического оформления является “фазоинвертор с пассивным излучателем (ПИ)”. На основе метода электромеханических аналогий построена эквивалентная акустическая схема разработанных АС. Передаточная функция фазоинверсной системы с малыми потерями, полученная из анализа эквивалентной схемы в области низких частот (НЧ), аналогична передаточной функции фильтра верхних частот (ВЧ) полиномиального типа четвертого порядка с крутизной спада амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в сторону НЧ 24 дб/окт. С учетом параметров, использованных НЧ головок громкоговорителей (ГГ), установлено, что АЧХ разработанных АС может быть аппроксимирована дробнорациональными функциями на основе полиномов четвертой степени Баттерворта или полиномами квазитретьего порядка. На основе предложенной методики рассчитаны основные конструктивные характеристики АС: объем корпуса, частота настройки ПИ, его масса и гибкость подвеса, разработана и представлена конструкция, приведены параметры АС. Отмечены более высокие характеристики разработанных АС по сравнению с аналогами

Ключевые слова: беспроводные сети передачи информации, Bluetooth, акустические системы (АС), мощность, уровень характеристической чувствительности, диапазон воспроизводимых частот

Введение

В последние годы с появлением цифровой обработки передаваемых данных и развитием микро- и наноэлектроники бурно развиваются технологии беспроводных сетей передачи информации, в том числе и персональных беспроводных сетей с небольшим радиусом действия – технология “Bluetooth”. В настоящее время интерфейс “Bluetooth” достаточно широко используется в различных мультимедийных устройствах – персональных компьютерах, планшетах, мобильных телефонах, периферийных устройствах и т.д. Широкое распространение этой технологии обусловлено, в первую очередь, относительно низкой стоимостью технологии и элементов, ее реализующих [1].

С ростом емкости и компактности флеш-памяти в мобильных устройствах становится возможным высококачественное воспроизведение музыки без потери качества при сжатии на этих устройствах. Вслед за мобильностью источников аудио-мобильными становятся и беспроводные акустические системы (АС), позволяющие принимать и воспроизводить звук с мобильных устройств (Google Music + iTunes Match – вся медиатека доступна с любого устройства) в местах, где установка проводных решений невозможна – в любой комнате дома, в дороге, на открытом воздухе и т.д.

С появлением новых прогрессивных стандартов передачи звука по Bluetooth – apt X HD с битрейтом 576 кб/с при передаче двухканального звука с диапазоном частот 10-22000 Гц и LD AC с битрейтом 990 кб/с с частотой дискретизации 96 кГц качество звука возросло настолько, что превосходит звучание CD-дисков и удовлетворяет требованиям большинства меломанов. В связи с этим многие производители откликнулись на требования рынка и стремительно занимают нишу Bluetooth АС. Среди них признанные мировые бренды, производящие Hi-Fi, Hi-End, профессиональные АС и другую звуковоспроизводящую аппаратуру: Klipsch, Bose, Dali, Cambridge Audio, Harman Kardon, Philips и т.д. Тем не менее практически у всех АС этого класса без применения сабвуфера отмечается невысокая эффективность воспроизведения низких частот (НЧ). Во-первых, невысокая мощность (редко выше 50 Вт) и уровень характеристической чувствительности (85-86 дБ), а также полоса воспроизводимых НЧ ограничена частотами 60-80 Гц, динамический диапазон не шире 105 дБ. Это скорее не недостаток, а данность, обусловленная требованиями к мобильности, а следовательно, к малогабаритности АС с Bluetooth, а это, в свою очередь, накладывает ограничения

© Бадаев А.С., Сукачев А.И., Алексеев В.О., Кондратов П.А., 2018

на габариты, массу и параметры головок громкоговорителей (ГГ), установленных в АС.

В связи с этим целью настоящей работы являлись разработка и расчет конструкции малогабаритных высокоэффективных и высококачественных АС, поддерживающих профили Bluetooth. При этом использовались подходы, наработанные при конструировании АС категории Hi-Fi и Hi-End в предыдущие годы, например [2, 3].

Разработка и расчет конструкции

Для решения этой непростой задачи требовалось выбрать малогабаритные излучатели с высокими мощностью и уровнем характеристической чувствительности. Мы остановили свой выбор на НЧ-СЧ ГГ фирмы «SeaS» (Норвегия) H149 и H760 диаметром 11 см, резонансной частотой 52-55 Гц и ВЧ-излучателях фирмы Wifa / Scan-Speak (Дания) D 2904/6000-01. Параметры ГГ следующие – H149: диаметр – 11 см; номинальная мощность – 60 Вт; максимальная мощность – 200 Вт; уровень характеристической чувствительности – 86 дБ; резонансная частота f_0 = 57 Гц; полная добротность $Q_п$ = 0,24; эквивалентный объем $V_э$ = 5,4 дм^3; диапазон воспроизводимых частот - 45 – 5000 Гц; номинальное сопротивление 8 Ом; диффузор из бумаги со специальной пропиткой.

H760: диаметр – 11 см; номинальная мощность – 70 Вт; максимальная мощность – 200 Вт; уровень характеристической чувствительности – 87 дБ; резонансная частота f_0 = 52 Гц; полная добротность $Q_п$ = 0,23; эквивалентный объем $V_э$ = 4,6 дм^3; диапазон воспроизводимых частот - 50 – 3500 Гц; номинальное сопротивление 8 Ом; диффузор из алюминиевого сплава.

D2904/6000-01: диаметр – 6 см; номинальная мощность – 150 Вт; уровень характеристической чувствительности – 90,5 дБ; резонансная частота f_0 = 750 Гц; диапазон воспроизводимых частот – 2.0 – 25 кГц; номинальное сопротивление 6 Ом.

Единственным видом акустического оформления для получения максимально высоких энергетических параметров при минимальных размерах корпуса в нашем случае является “фазоинвертор” (рис. 1).

Поскольку в этой классической конструкции труба фазоинвертора занимает значительный объем, который надо учитывать при расчете объема корпуса, для сохранения небольших габаритов был выбран “фазоинвертор с пассивным излучателем ПИ” [4]. ПИ представляет собой жесткую пластину на гибком подвесе или подвижную систему ГГ без магнита и звуковой катушки, на нужную частоту $f_ф$ ПИ настраивается с помощью дополнительных грузов, устанавливаемых в центре пластины.

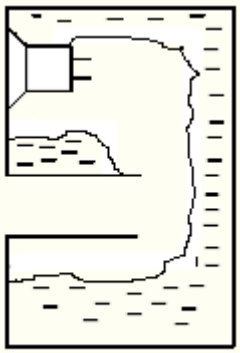


Рис. 1. Схема фазоинвертора

Для расчета АС и анализа процессов в них на НЧ успешно применяется метод электромеханических аналогий. Метод основан на замене механических и (или) акустических параметров, элементов или систем соответствующими электрическими аналогами с последующим применением хорошо разработанного и удобного математического аппарата теории четырехполюсников [5]. При анализе электрических четырехполюсников используют передаточную функцию, которую в случае АС в области НЧ можно представить в следующем виде

$$T(S) = P_{вых}(S)/U_{вх}(S), \qquad (1)$$

где $P_{вых}(S)$ – комплексный выходной сигнал – звуковое давление;

$U_{вх}(S)$ – комплексный входной сигнал – электрическое напряжение;

$S = j\omega$ – комплексная частота.

Поскольку “фазоинвертор” на НЧ, как и многие другие оформления, является системой с сосредоточенными параметрами, передаточная функция такой системы может быть аппроксимирована дробно-рациональной функцией [4]

$$T_n(S) = W_m(S)/G_n(S), \qquad (2)$$

где $W_m(S)$ и $G_n(S)$ – полиномы степени m и n≥m соответственно.

$T(S)$ АС в области НЧ в общем виде может быть представлена в виде:

$$T(S) = H_a(S)H_k(S), \qquad (3)$$

где $H_a(S)$ и $H_k(S)$ – передаточные функции ГГ в корпусе и корректирующей цепи.

В случае оформления “закрытый корпус”, без корректирующей цепи

$$H_k(S) = 1, T_2(S) = H_{a2}(S) = AS^2/(a_2S^2 + a_1(S) + a_0), \quad (4)$$

где A_1, a_0, a_1, a_2 – коэффициенты, зависящие от электромеханических параметров ГГ и корпуса.

Для “фазоинвертора” без корректирующей цепи передаточная функция может быть аппроксимирована в виде отношения полиномов четвертого порядка

$$H_k(S) = 1, T_4(S) = H_{a4}BS^4/(b_4S^4 + b_3S^3 + b_2S^2 + B_1S + b_0), \quad (5)$$

где $B, b_0 - b_4$ – вещественные коэффициенты, зависящие от параметров ГГ, корпуса и ПИ: массы, гибкости, частоты настройки, механических потерь.

Выражение (5) аналогично передаточной функции фильтра верхних частот, полиномиального типа четвертого порядка, АЧХ которых претерпевает спад в сторону НЧ с крутизной 24 дБ/окт.

По передаточным функциям можно вычислить важные характеристики АС: АЧХ, ФЧХ (фазочастотная характеристика) и ГВЗ – групповое время задержки, параметр, который характеризует искажение ФЧХ.

Эквивалентная акустическая схема “фазоинвертора с ПИ” представлена на рис. 2.

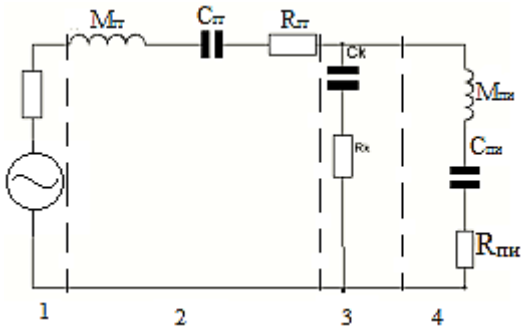


Рис. 2. Упрощенная эквивалентная акустическая схема фазоинвертора с ПИ: 1 – источник сигнала; 2 – ГГ; 3 – корпус; 4 - ПИ; $M_{гг}$ – масса подвижной системы ГГ вместе с присоединенной массой воздуха; $C_{гг}$ – гибкость подвижной системы ГГ; $R_{гг}$ – акустическое сопротивление потерь в подвижной системе; $C_к$ – гибкость воздуха в корпусе; $R_к$ – акустическое сопротивление потерь в корпусе; $M_{пи}$ – масса ПИ с присоединенной массой воздуха; $C_{пи}$ – гибкость подвеса ПИ; $R_{пи}$ – акустическое сопротивление потерь в подвесе ПИ

Анализ эквивалентной схемы показывает, что она является аналогом схемы связанных электрических контуров (в АС один контур образуется из $M_{гг}$, $C_{гг}$ и $C_к$, связанного через гибкость воздуха в корпусе $C_к$ с другим контуром, образованным $M_{пи}$ и $C_{пи}$). АЧХ АС типа “фазоинвертор с ПИ” соответствует электрическому фильтру четвертого порядка с крутизной спада 24 дБ/окт. Форма АЧХ определяется полиномами какого типа могут быть аппроксимированы передаточные функции таких фильтров, в зависимости от этого они называются фильтрами Чебышева, Баттерворта, квазитретьего порядка и т.д. Частотная зависимость модуля полного сопротивления ГГ, установленной в фазоинвертор с ПИ, совпадает с аналогичной зависимостью для связанных электрических контуров (рис. 3), расстояние между пиками также характеризует фактор связи контуров.

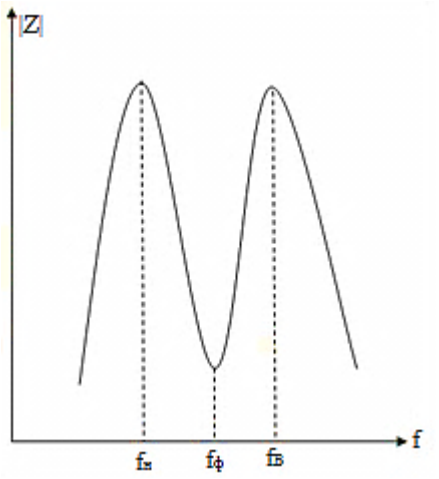


Рис. 3. Частотная зависимость модуля полного сопротивления |Z| ГГ в фазоинверторе с ПИ

При настройке ПИ с помощью дополнительных грузов добиваются, чтобы “провал” между пиками совпадал с рассчитанной частотной фазоинвертора $f_ф$. В грамотно рассчитанном фазоинверторе пики |Z| должны быть одинаковыми по высоте, отношение частот $f_в/f_н = 3$.

Используя номограммы для расчета фазоинвертора и учитывая, что с влиянием активного сопротивления индуктивности разделительного фильтра первого порядка, полная добротность 2-х НЧ-СЧ ГГ составит Qп ≅ 0,3, получим, что в нашем случае следует воспользоваться аппроксимацией промежуточной между аппроксимацией по Баттерворту и квазитретьем порядком [4, 5]. В этом случае получаем максимально гладкую АЧХ в области НЧ, объем

корпуса $V_k = 2.8\,\text{дм}^3$, $f_\text{ф} = 62\text{Гц}$. Частота настройки ПИ определяется его массой и гибкостью подвеса.

$$f_\text{пи} = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_\text{пи}C_\text{пи}}}. \qquad (6)$$

Пластина ПИ представляет собой алюминиевый диск диаметром 100 мм и толщиной 1 мм с массой 27 г. Гибкость подвеса ПИ определяется из формулы (6)

$$\text{С}_\text{пи} = \frac{1}{4\,\pi^2 f_\text{пи}^2 M_\text{пи}}. \qquad (7)$$

Для получения максимально высокой частоты настройки ПИ $f_\text{пи} = 65$ Гц, $\text{С}_\text{пи} = 23 * 10^{-5}\frac{\text{м}}{\text{н}}$.

При этом, например, для получения $f_\text{пи} = 55$ Гц масса дополнительного груза должна быть $m_\text{доп} \cong 10\text{г}$.

Описание конструкции

Была разработана конструкция АС с Bluetooth, схема которой приведена на рис. 4.

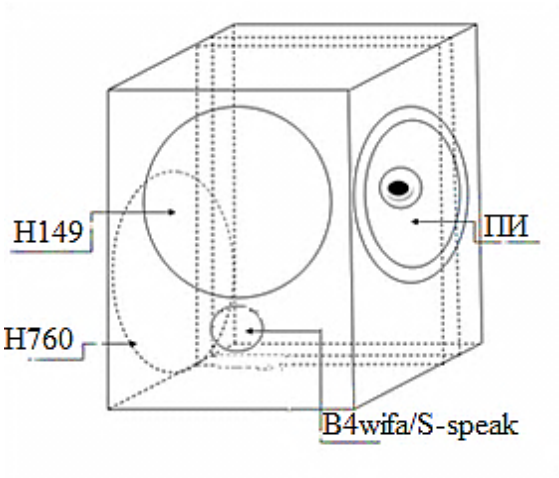


Рис. 4. Схема разработанных АС с Bluetooth

Конструкция представляет собой фазоинвертор с ПИ, обе НЧ-СЧ ГГ нагружены на один объем. На передней панели установлены вверху ГГ Н149, внизу D2904/6000-01, такое расположение, как показывает опыт, улучшает диаграмму направленности в горизонтальной плоскости. На левой стороне, внизу, расположена ГГ Н760, на правой, вверху, ПИ, вторая АС выполнена симметрично, сзади предусмотрен отсек размерами 20х11х6 см под усилитель с модулем Bluetooth, имеются разделительные фильтры, блок питания, радиатор, разъемы, органы управления и коммутации, предусмотрена возможность питания от источника постоянного тока. Электрические схемы разделительных фильтров для двух возможных вариантов включений показаны на рис. 5 [6].

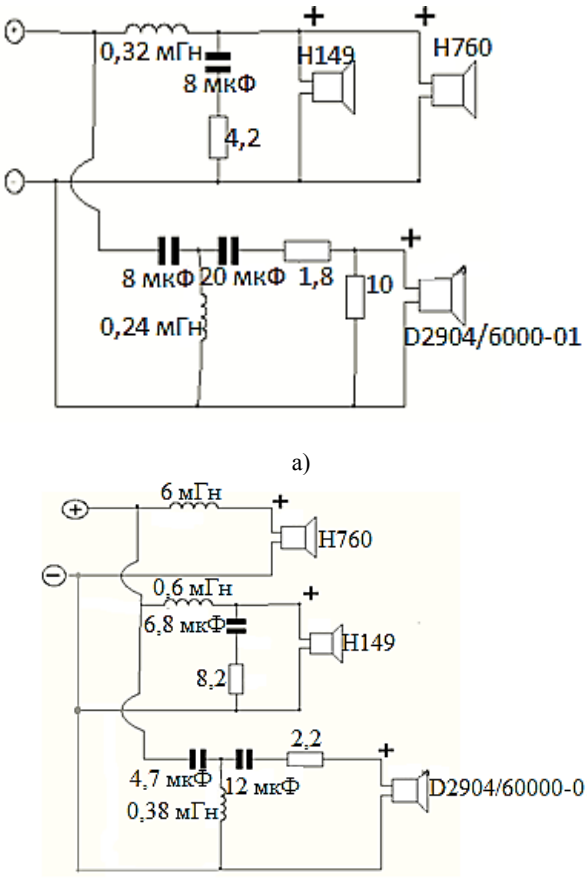


Рис. 5. Схемы разделительных фильтров:
а) номинальное сопротивление - 4 Ом;
б) номинальное сопротивление – 8 ОМ

Схема (а) представляет собой двухполосный вариант с частотой раздела 2,4 кГц и номинальным сопротивлением 4 Ом, схема (б) является квазитрехполосной, в которой ГГ Н760 выполняет роль сабвуфера, частоты раздела в этом случае 200 Гц и 2,4 кГц, номинальное сопротивление – 8 Ом. В фильтрах используются высококачественные полипропиленовые конденсаторы “Solen” (Франция). Корпус АС выполнен из MDF – плиты толщиной 16 мм и частично заполнен звукопоглотителем. В случае профессионального исполнения для изготовления корпуса возможно использование специальных алюминиево-магниевых сплавов с высоким декрементом затухания. Фронтальная поверхность АС и ГГ Н760, установленная на боковой стороне, закрыты съемными декоративными рамками, обтянутыми специальным материалом с высокой акустической прозрачностью.

Основные технические характеристики

Основные технические характеристики разработанных АС следующие.

Номинальная мощность – 140 Вт, максимальная мощность – 400 Вт, номинальное сопротивление – 4 и 8 ОМ, диапазон воспроизводимых частот, при настройке ПИ на 50 ГЦ: 35 – 25000 Гц, уровень характеристической чувствительности – 90 дБ, габариты: 23*14*22 см, масса без усилителя – 3,6 кг.

Для сравнения приводим характеристики напольной четырехполосной акустической системы “Radiotehnika s-400M”.

Максимальная мощность – 400 Вт, диапазон воспроизводимых частот – 25 – 25000 Гц, уровень характеристической чувствительности – 89 дБ, диаметр НЧ ГГ – 25 см, диаметр mid-bass ГГ – 20 см, габариты – 90*32,5*28 см, масса – 26 кг.

Заключение

Разработанные АС могут быть использованы в трактах высококачественного звуковоспроизведения Hi-Fi, в системах конференц-связи, в качестве студийных контрольных мониторов.

Литература

1. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.Н. Вишневский, А.И. Лехов, С.Л. Портной и др. М.: Техносфера, 2005. 592 с.

2. Бадаев А.С. Малогабаритные акустические системы на основе акустического лабиринта // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 4. С. 75-78.

3. Бадаев А.С., Гукин Д.В. Высококачественная рупорная акустическая система // Проектирование радиоэлектронных и лазерных устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2011. С. 70-88.

4. Электроакустика и звуковое вещание: учеб. пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов и др.; под ред. Ю.А. Ковалгина. М.: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. 872 с.

5. Акустика: справочник / А.П. Ефимов, А.В. Никонов, М.А. Сапожников и др.; под ред. М.А. Сапожникова. 2–е изд. перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 336 с.

6. Бадаев А.С. Разделительные фильтры для высококачественной двухполосной акустической системы // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2006. С. 268-273.

Поступила 22.05.2018; принята к публикации 20.09.2018

Информация об авторах

Бадаев Андрей Станиславович – канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-952-553-86-63, e-mail: andrbad56@yandex.ru

Сукачев Александр Игоревич – ст. преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-920-219-6353, e-mail: mag.dip@yandex.ru

Алексеев Владислав Олегович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-950-778-00-65, e-mail: alekseewlad@yandex.ru

Кондратов Павел Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-910-347-98-11, e-mail: Pavelkon0695@mail.ru

HIGH-QUALITY SMALL ACOUSTIC SYSTEMS FOR WIRELESS INFORMATION TRANSMISSION NETWORKS

A.S. Badaev, A.I. Sukachev, V.O. Alekseev, P.A. Kondratov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in the work the design of high-quality, high-performance small-sized acoustic systems (AS) for wireless information transmission systems - a personal Bluetooth network is calculated and developed. It is shown that in order to achieve the highest possible energy characteristics with small dimensions, the optimal type of acoustic design is a "phase-inverter with a passive radiator (PR)". On the basis of the method of electromechanical analogies an equivalent acoustic scheme of the developed AS is constructed. The transfer function of the low-loss phase-input system obtained from the analysis of the equivalent circuit in the low-frequency region (LF) is similar to the transfer function of the fourth-order polynomial type high-pass filter (HF) with a slope of the amplitude-frequency characteristic decreasing toward the LF 24 dB / oct. Taking into account the parameters used by the low-frequency loudspeaker heads (LH), it is established that the frequency response of the developed AS can be approximated by fractional rational functions based on fourth order Butterworth polynomials or by quasi- order polynomials. Based on the proposed methodology, the main design characteristics of the AS are calculated: the volume of the casing, the frequency of adjustment of the PR, its mass and suspension flexibility, a design is developed and presented, and the parameters of the AS are listed. The higher characteristics of the developed systems are compared with the analogues

Key words: wireless information transmission networks, Bluetooth, acoustic systems (AS), power, level of characteristic sensitivity, range of reproduced frequencies

References

1. Vishnevsky V.N., Lekhov A.I., Portnoy S.L. "Broadband wireless data transmission networks" ("Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informatsii"), Moscow, Tekhnosfera, 2005, 592 p.

2. Badaev A.S. "Small-size acoustic systems based on an acoustic labyrinth", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol.13, no. 4, pp. 75-78.

3. Badaev A.S., Gukin D.V. "High-quality horn speaker system", *Designing of radio-electronic and laser devices and systems: interuniversity collection of scientific papers (Proektirovaniye radio-elektronnykh i lazernykh ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr)*, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2011, pp. 70-88.

4. Aldoshina I.A., Vologdin E.I., Efimov A.P. et al, ed. Kovalgin Yu.A. "Electroacoustics and sound broadcasting: manual" ("Elektroakustika i zvukovoe veshchanie: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, Goryachaya liniya - Telecom, Radio i svyaz', 2007, 872 p.

5. Efimov A.P., Nikonov A.V., Sapozhnikov M.A. "Acoustics: Reference book", Moscow, Radio i svyaz', 1989, 336 p.

6. Badaev A.S. "Separating filters for high-quality two-way speaker system", *Problems of ensuring reliability and quality of instruments, devices and systems: interuniversity collection of scientific papers (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.),* Voronezh, VSTU, 2006, pp. 268-273.

Submitted 22.05.2018; revised 20.09.2018

Information about the authors

Andrey S. Badaev, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-952-553-86-63, e-mail: andrbad56@yandex.ru

Aleksandr I. Sukachev, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-920-219-6353, e-mail: mag.dip@yandex.ru

Vladislav O. Alekseev, Student , Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-950-778-00-65, e-mail: alekseewlad@yandex.ru

Pavel A. Kondratov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-910-347-98-11, e-mail: Pavelkon0695@mail.ru

УДК 621-321

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МНОГОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В КОРПУСЕ 1867ВА016Т

Г.В. Фетисов[1,2], Д.В. Шеховцов[2], Е.Д. Алперин[1]

[1]Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия
[2]Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается высокопроизводительная многопроцессорная система цифровой обработки сигналов (ЦОС) в корпусе 1867ВА016Т, разрабатываемая АО «НИИЭТ», в части оценки эффективности использования различного количества ядер для решения задач цифровой обработки сигналов с целью обоснования использования именно многопроцессорных систем для решения задач ЦОС. Рассмотрена процедура связи процессорных ядер через коммутационные порты, которые обеспечивают приём/передачу данных со скоростью до 480 Мбайт/с, а также способы объединения ядер по технологии гиперкуба с различной размерностью с целью повышения вычислительной мощности. Составлена универсальная программа расчёта быстрого преобразования Фурье (БПФ) на языках С и Assembler для каждого из ядер 1867ВЦ3Ф и различного количества исходных отсчётов. Проведена оценка производительности многоядерной системы ЦОС в корпусе 1867ВА016Т, содержащей четыре процессора цифровой обработки сигналов (ПЦОС), при различном количестве активных процессорных ядер посредством определения времени выполнения 64-точечного и 512-точечного БПФ с подсчётом контрольной суммы (КС) и без. Результатом исследования являются временные диаграммы и графики, отображающие время выполнения БПФ для 64 и 512 исходных отсчётов и количества активных ядер 1867ВА016Т. Предложено оптимальное количество процессорных ядер, которые следует задействовать для решения задач ЦОС при работе с общей областью памяти для многопроцессорных систем в корпусе или на кристалле с архитектурой, аналогичной 1867ВА016Т

Ключевые слова: коммутационный порт, БПФ, многоядерная система, гиперкуб, ПЦОС, производительность, Assembler, С

Введение

В настоящее время цифровая обработка сигналов (ЦОС) широко используется для решения задач, связанных с цифровой фильтрацией, кодированием речи, обработкой изображений, быстрым преобразованием Фурье (БПФ), телекоммуникацией и цифровой звукотехникой.

ЦОС имеет особенности:

- Большой объём вычислений;
- Работа в реальном времени;
- Гибкость системы;
- Обработка цифровых данных.

Повышение производительности современных процессоров ЦОС достигается двумя путями: повышением тактовой частоты и увеличением количества процессорных ядер в составе интегральной схемы [1].

В случаях, когда удаётся добиться повышения тактовой частоты процессора, рост производительности наблюдается сразу. Однако современная технология производства не позволяет экспоненциально увеличивать тактовую частоту, так как она, в свою очередь, связана с размерами элементной базы на кристалле процессора [2]. Последний путь позволяет достичь существенного увеличения общей производительности системы за счёт параллельного выполнения вычислительных операций и одновременной обработкой запросов периферийных устройств, находящихся в составе схемы, требует написания соответствующего программного обеспечения (ПО), которое будет рационально использовать ресурс всех имеющихся ядер [1].

Постановка задачи

Задача состоит в оценке эффективности использования именно многопроцессорных систем ЦОС на кристалле с целью повышения производительности на базе многоядерной высокопроизводительной системы в корпусе 1867ВА016, содержащей четыре ядра 32-разрядного процессора ЦОС с плавающей точкой 1867ВЦ3Ф и десять различных периферийных устройств.

Метод исследования

Пусть имеется высокопроизводительная многоядерная система ЦОС в корпусе с количеством процессоров n и тактовой

© Фетисов Г.В., Шеховцов Д.В., Алперин Е.Д., 2018

частотой f МГц. Данную систему подвергают тестированию, выясняют время, за которое она выполняет задачи ЦОС. После чего, не меняя тактовой частоты, производят программное отключение одного из ядер и подвергают систему тем же тестам, что и при большем количестве ядер с теми же начальными условиями. Процедура продолжается до тех пор, пока не будут получены результаты производительности для случая действия одного процессорного ядра.

В данном исследовании использовалась высокопроизводительная многоядерная система ЦОС на кристалле 1867ВА016 с характеристиками процессорного ядра, приведёнными в табл. 1.

Таблица 1

Разрядность АЛУ, бит: - плавающая запятая (ПЗ) - фиксированная запятая (ФЗ)	 40 32
Разрядность умножителя, бит: - плавающая запятая - фиксированная запятая	 40 × 40 32 × 32
Объем ПЗУ, бит	4К × 32
Объем ОЗУ, бит	2К × 32
Объем кэш-ОЗУ, бит	128 × 32
Объем адресуемой памяти, бит	4Г × 32
Таймеры	2
8-разрядные коммутационные порты	6
Сопроцессор ПДП, количество каналов	6
Тактовая частота процессора, МГц, не менее	200
Производительность: - фиксированная запятая, MIPS, не менее - плавающая запятая, MFLOPS, не менее	 100 200
Количество ядер	4
Система команд ПЦОС	1867ВЦ3Ф

Написана универсальная программа вычисления БПФ для различного количества исходных отсчётов и числа активных процессорных ядер.

На рис. 1 представлены коммутационные порты, через которые соединены процессорные ядра. Коммутационные порты обеспечивают приём/передачу данных со скоростью до 480 Мбайт/с. Это даёт возможность осуществлять эффективную мультипроцессорную обработку данных. На рис. 1 также приведена архитектура, отображающая объединение глобальных шин процессоров посредством арбитра таким образом, что первое и третье процессорные ядра имеют общую глобальную шину данных, посредством которой осуществляется обращение к общей области памяти. Аналогична связь глобальных шин данных между вторым и четвёртым ядрами. Последнее не позволит задействовать вычислительную мощность всех четырёх процессорных ядер для расчёта БПФ с хранящимися в общей области памяти исходными отсчётами, зато для случая действия двух процессорных ядер такой проблемы не возникает [3].

Результаты анализа производительности получены при неизменной тактовой частоте процессора 200 МГц для случая действия одного, двух и четырёх процессорных ядер.

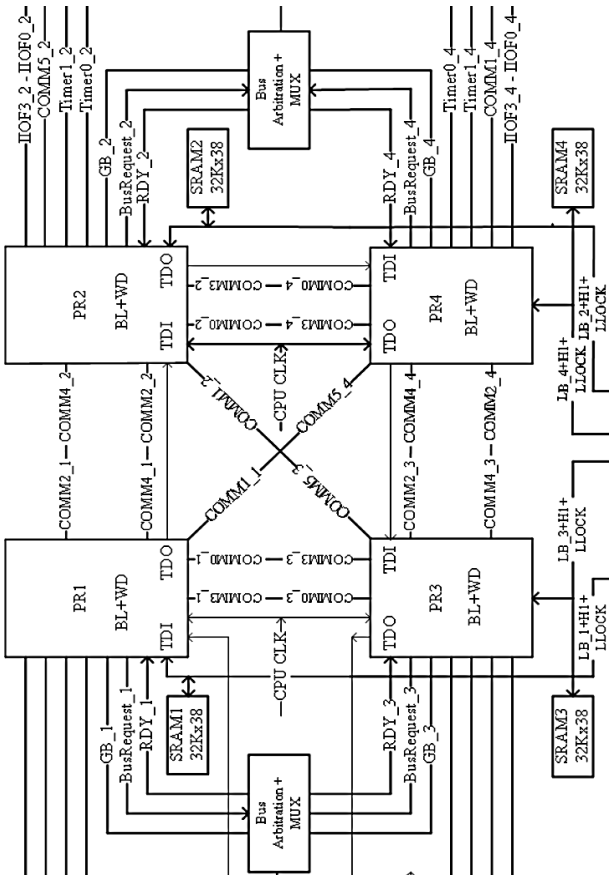


Рис. 1

Реализация алгоритма БПФ

Современная техника связи требует спектрального анализа. Сигналы представляются в частотной области для анализа характеристик сигналов и блоков приёмопередатчиков. Для преобразования сигналов в частотную область используют прямое преобразование Фурье, однако современные системы радиосвязи требуют обработки цифровых отсчётов сигнала. Преобразование Фурье для цифровых отсчётов

называется дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) и записывается следующим образом [4]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \omega_N^k(n), \qquad k = 0,1,\dots,N-1, \qquad (1)$$

где $X(k)$ – спектр сигнала, а комплексная спектральная функция:

$$\omega_N^k(n) = \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - jsin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) = e^{-\frac{j2\pi kn}{N}}. \qquad (2)$$

Для чётного N справедливо следующее:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n)\omega_{\frac{N}{2}}^k(n) + w_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2n+1)\omega_{\frac{N}{2}}^k(n), \quad (3)$$

где w_N^k – поворачивающий множитель, не зависящий от номера отсчёта входного сигнала n,

$$w_N^k = \omega_N^k(1) = e^{-\frac{j2\pi k}{N}}. \qquad (4)$$

С учётом преобразования в линейную комбинацию двух дискретных преобразований Фурье половин сигнала $x(2n)$ и $x(2n+1)$ с $N/2$ отсчётами необходимо выполнить $N^2/2 + 1$ операций комплексного умножения со сложением.

Для случаев, когда N является степенью двойки, деление входного сигнала можно продолжать, пока не будет получено двухточечное преобразование. Такой алгоритм эффективного вычисления ДПФ называют быстрым преобразованием Фурье. БПФ требует $N \log N$ комплексных операций умножения со сложением [4].

Входные отсчёты сигнала, спектр которого требуется получить, записываются в преобразованном формате Q32 в общую область памяти. Последовательность отсчётов, являющаяся исходными данными для БПФ, располагается в общей области памяти в виде: $Re[x(0)], Im[x(0)], \dots, Re[x(63)], Im[x(63)]$.

Массив исходных данных в общей области памяти подвергается перестановке, в результате чего исходная последовательность представляется в бит-реверсном порядке, данная процедура отображена в табл. 2.

Таблица 2

Индекс	До	После	Бит-реверсный индекс
0	000	000	0
1	001	100	4
2	010	010	2
3	011	110	6
4	100	001	1
5	101	101	5
6	110	011	3
7	111	111	7

Исходный код программы на языках «C» и «Assembler» состоит из следующих частей:

- Инициализации процессорных ядер;
- Основного файла;
- Подпрограмм промежуточных вычислений для БПФ.

После выполнения расчётов производится подсчёт контрольной суммы результата. Контрольная сумма сравнивается с заранее посчитанным правильным значением, при наличии ошибок устанавливается флаг ошибки. На указанную процедуру процессор также затрачивает определённое время, что позволяет лучше оценить изменение производительности многопроцессорной системы от количества активных ядер.

Оценка времени выполнения 64-точечного БПФ при различном количестве активных ядер

Оценка времени производится для двух случаев, когда контрольная сумма результата подсчитывается и когда её подсчёт не производится. В табл. 3 приведены результаты выполнения 64-точечного БПФ при различном количестве активных ядер системы ЦОС.

Таблица 3

Задача	Количество активных ядер		
	1	2	4
64-точечное БПФ с подсчётом КС	703 мкс	333 мкс	443 мкс
64-точечное БПФ без подсчёта КС	446 мкс	203 мкс	312 мкс

Время выполнения БПФ сократилось более чем в два раза при задействовании двух процессорных ядер вместо одного. Это связанно с тем, что процедура бит-реверсной перестановки происходит параллельно, каждый процессор работает со своими ячейками общей

памяти, а межпроцессорный обмен осуществляется с помощью асинхронных коммутационных портов практически мгновенно. На рис. 2 приведены временные диаграммы в момент межпроцессорного обмена данными через коммутационные порты.

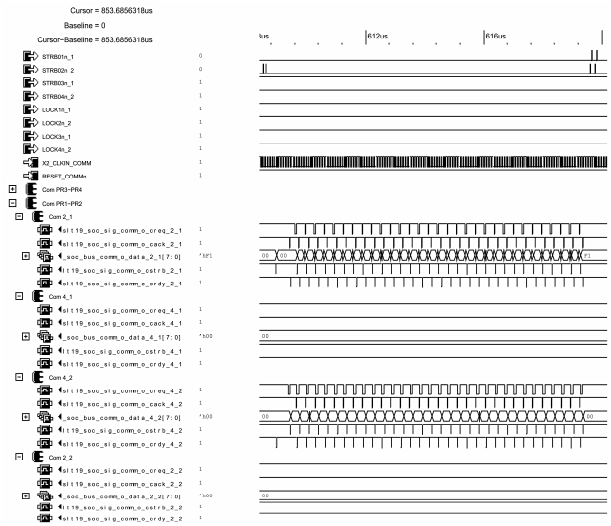


Рис. 2

Задействование четырёх процессорных ядер приводит к снижению времени выполнения БПФ по сравнению с двумя активными ядрами, причиной этому служит использование общей глобальной шины адреса ПЦОС1 и ПЦОС3, а также ПЦОС2 и ПЦОС4, с помощью которой осуществляется обращение к общей области памяти. В результате происходит простой конвейера, ядрам 1867ВА016Т приходится ждать, когда глобальная шина будет освобождена парным ядром. Таким образом, время загрузки данных остаётся практически неизменным по отношению к времени загрузки с использованием двух процессорных ядер, однако уже в процессе вычисления подпрограмм из-за высокой частоты обращения ПЦОС к общей области памяти наблюдаем существенное увеличение времени выполнения БПФ или снижение производительности.

Время подсчёта контрольной суммы для случая действия одного процессорного ядра составляет 257 мкс, для двух – 130 мкс, а для четырёх 131 мкс. Когда мы задействуем два ядра взамен одного, то подсчёт контрольной суммы осуществляется двумя ПЦОС одновременно с использованием двух глобальных процессорных шин данных, обращаясь к общей области памяти. По причине того, что у 1867ВА016Т в распоряжении имеется всего две глобальные шины, время подсчёта контрольной суммы одинаково при задействовании двух и четырёх процессорных ядер.

Оценка времени выполнения 512-точечного БПФ при различном количестве активных ядер

В табл. 4 приведены результаты выполнения 512-точечного БПФ при различном количестве активных ядер системы ЦОС.

Таблица 4

Задача	Количество активных ядер		
	1	2	4
512-точечное БПФ с подсчётом КС	5631 мкс	2672 мкс	3549 мкс
512-точечное БПФ без подсчёта КС	3571 мкс	1633 мкс	2510 мкс

Можно заметить, что результаты аналогичны результатам, полученным при 64 исходных отсчётах. Чем больше количество исходных отсчётов, тем меньше на результат влияет межпроцессорная передача, которая осуществляется мгновенно посредством асинхронных коммутационных портов.

Обобщение результатов

На рис. 3-4 приведены результаты исследования в обобщённом виде, отображающие время выполнения БПФ при различном количестве активных ядер системы ЦОС в корпусе 1867ВА016Т, а также для различного числа исходных отсчётов в микросекундах.

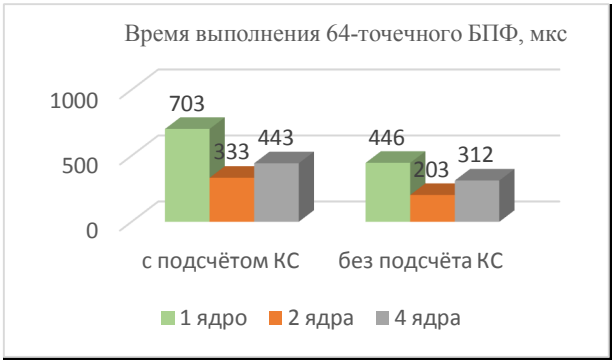


Рис. 3

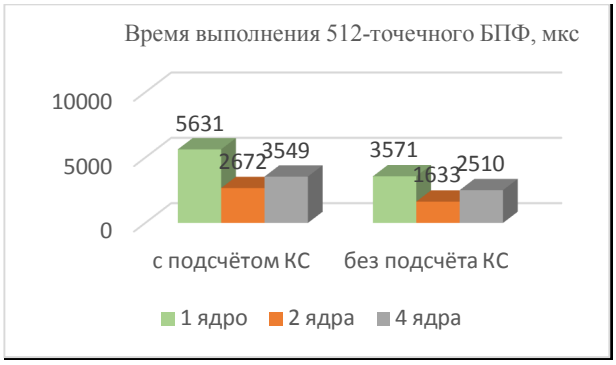


Рис. 4

Как можно заметить, не всегда целесообразно задействовать все процессорные ядра. Прежде чем писать программу, необходимо ознакомиться с архитектурой вычислительной системы. Применительно к ИС 1867ВА016Т оказалось, что использование двух процессорных ядер для работы с общей областью памяти даёт лучшие показатели производительности. Причиной организации именно такой архитектуры являются требования к площади кристалла, ведь помимо процессорных ядер система ЦОС содержит множество периферийных устройств, а увеличение площади, занимаемой на кристалле, существенно повышает стоимость изделия. В системе 1867ВА016Т все четыре ядра рекомендуется задействовать при работе с множеством периферийных устройств, обмен данными между которыми осуществляется с помощью локальной области памяти, которая имеется у каждого процессорного ядра собственная.

Заключение

Анализ показал, что увеличение количества активных ядер в системах ЦОС на кристалле с целью получения большей производительности имеет место. В этом случае программисту необходимо внимательно изучить архитектуру процессора.

Для решения задач ЦОС не всегда большее число задействованных ядер приводит к повышению быстродействия. На примере высокопроизводительной многоядерной системы на кристалле 1867ВА016Т показано, что для вычисления БПФ целесообразно задействовать два процессорных ядра, а не четыре.

Литература

1. Кожин А.С. Проблемы передачи данных между асинхронными доменами вычислительного устройства // Вопросы радиоэлектроники, серия ЭВТ. 2011. № 3.

2. Мэлоун М. The Intel. Как Роберт Нойс, Гордон Мур и Энди Гроув создали самую влиятельную компанию в мире; пер. с англ. Е. Тортуновой. М.: Эксмо, 2015. 544 с.

3. АО «НИИЭТ». Микросхемы интегральные 1667ВЦ6Ф, 1867ВЦ6АФ Руководство пользователя / АО «НИИЭТ» КФДЛ.431299.016ТО. Режим доступа: https // niiet.ru/wp-content/uploads/2.5.1.0_1867ВЦ6Ф1867ВЦ6АФ_Тропа-1.pdf.

4. Panos Papamichalis, John So. Implementation of Fast Fourier Transform Algorithms with the TMS32020 / Texas Instruments. Digital Signal Processing Solutions, 1989. 102 p.

Поступила 21.06.2018; принята к публикации 14.09.2018

Информация об авторах

Фетисов Георгий Викторович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), инженер лаборатории проектирования процессоров ЦОС и систем на кристалле, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), тел. +79038510776, e-mail: gfetisov@list.ru

Шеховцов Дмитрий Витальевич – канд. техн. наук, начальник лаборатории проектирования процессоров ЦОС и систем на кристалле, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 5), тел. +79081326813, e-mail: wexwex@mail.ru

Алперин Евгений Данилович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79521068661, e-mail: aed@yandex.ru

PRODUCTIVITY ANALYSIS OF THE MULTI-PROCESSOR SYSTEM OF DIGITAL PROCESSING OF SIGNALS IN THE CASE 1867VA016T

G.V. Fetisov[1,2], D.V. Shekhovtsov[2], E.D. Alperin[1]

[1]Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
[2]Joint-stock company "Research Institute of Electronic Technology", Voronezh, Russia

Abstract: the article studies a high-performance multiprocessor digital signal processing system in the 1867BA016T case developed by the JSC "Scientific Research Institute of Electronic Technology", evaluats the efficiency of using a different number of cores to solve digital signal processing (DSP) problems in order to justify the use of multiprocessor systems for DSP tasks. The procedure for communication of processor cores through switching ports that provide data transmission/reception at speeds up to 480 MB/s, as well as methods for combining cores using hypercube technology with various dimensions for the purpose of increasing processing power are considered. A universal program for calculating Fast Fourier Transform (FFT) in C and Assembler languages for each of 1867VTS3F cores and a different number of initial readings were compiled. The performance of the multi-core DSP system in the 1867BA016T case containing four digital signal-processing processors (DSPs) is estimated, with different number of active processor cores, by determining the execution time of the 64-point and 512-point FFT with or without the checksum calculation. The result of the study is the time diagrams and graphs showing the time of FFT execution for 64 and 512 initial samples and the number of active nuclei 1867BA016T. An optimal number of processor cores was proposed, which should be used to solve DSP tasks when working with a common memory area for multiprocessor systems in a chassis or on a chip with the architecture similar to the 1867BA016T

Key words: COM port, FFT, multi-core system, hypercube, DSP, performance, Assembler, C

References

1. Kozhin A.S. “Problems of data transmission between asynchronous domains of a computing device”, *Questions of radio electronics (Voprosy radioelektroniki, seriya EVT)*, 2011, no. 3.

2. Malone M. “The Intel Trinity: How Robert Noyce, Gordon Moore, and Andy Grove built the world's most important company” (trans. from English by Tortunova E.), Moscow, Eksmo, 2015, 544 p.

3. “Integrated microcircuits 1667VTS6F, 1867VTS6AF User's manual”, JSC "NIIET", available at: https // niiet.ru/wp-content/uploads/2.5.1.0_1867ВЦ6Ф1867ВЦ6АФ_Тропа-1.pdf.

4. Papamichalis P., So J. “Implementation of fast fourier transform algorithms with the TMS32020”, Texas Instruments, Digital Signal Processing Solutions, 1989, 102 p.

Submitted 21.06.2018; revised 14.09.2018

Information about the authors

Georgiy V. Fetisov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), Engineer, JSC "Research Institute of Electronic Technology" (5 Starykh Bol’shevikov st., Voronezh 394033, Russia), e-mail: gfetisov@list.ru.
Dmitriy V. Shekhovtsov, Cand. Sc. (Technical), Head of Laboratory, JSC "Research Institute of Electronic Technology" (5 Starykh Bol’shevikov st., Voronezh 394033, Russia), e-mail: wexwex@mail.ru
Evgeniy D. Alperin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: aed@yandex.ru

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ОТНОШЕНИЙ В УСТРОЙСТВАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ РАЗНЫЕ ПРИНЦИПЫ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА

Д.В. Васильченко, А.А. Пирогов, И.В. Остроумов, А.Б. Антиликаторов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в настоящее время бурно развивается беспроводная электроника. В частности, носимые гаджеты, которые для связи с разнообразными устройствами не так давно пользовались проводными системами, повсеместно внедряют в качестве связующих элементов передачи информации беспроводные каналы связи. К ним относятся разнообразные периферийные устройства, такие как наушники, умные часы и т.д. Все эти каналы работают на определенных частотах, которые могут быть заглушены воздействием различного рода электромагнитных помех. Данные помехи негативно влияют не только на прием сигнала, но и на сами устройства приема и передачи, а также на все электронные устройства, находящиеся в зоне действия помех. В статье показана методика определения соотношения сигнал/шум и вычисления защитного отношения, с помощью которой можно определять защитное отношение по высокочастотному тракту и по промежуточной частоте без проведения испытаний, требующих больших временных и материальных затрат. Данная методика подходит к использованию в радиоэлектронных средствах, использующих сигналы с фазовой, а также частотной модуляцией, в отношении радиопомех различных видов. К таким помехам относятся импульсные и непрерывные радиопомехи на основе фазоманипулированных сигналов, частотно-модулированных сигналов и сигналов, модулированных по частоте гармоническим или пилообразным напряжением

Ключевые слова: радиоэлектронные средства, манипуляция сигнала, системы беспроводной связи, соотношение сигнал/шум, защитное отношение

Введение

В связи с увеличением общего количества электронных радиоустройств при проектировании радиоэлектронных средств (РЭС) большое значение уделяется оптимальному соотношению сигнал/шум (помеха). Данное соотношение можно достичь путём защиты РЭС от воздействий всякого рода помех и внешних факторов. Защита РЭС связана с разработкой и организацией целого ряда мероприятий, направленных на обеспечение электромагнитной совместимости (далее ЭМС) РЭС. Принимая в расчёт тот факт, что в современных устройствах телеметрии и связи всё чаще применяют фазовую манипуляцию, как простой, так и сложной формы, а также упрощенные процессы деманипуляции и манипуляции сигналов. Была заработана методика расчёта соотношений сигнал/шум в устройствах, использующих фазовую манипуляцию с разнообразными формами огибающей элементарной посылки. Данная методика производит расчёты по основным составным частям, к таким можно отнести высокочастотный тракт, а также тракт, работающий на промежуточной частоте.

Описание методики

Методика основывается на использовании свертки гистограмм уровней откликов системы, которые формируются моделью, с целью пошагового сдвига на мешающий и полезный сигналы. Это является отличительной особенностью методики, позволяющей проводить моделирование и определять соотношение сигнал/шум с заданной точностью. Плюсом методики также является отсутствие необходимости проведения сложных расчётов по моделированию прохождения радиопомех, использующих однотипный сигнал с различным уровнем мощности, фазы и смещения по времени относительно полезного сигнала.

Снижение трудоёмкости расчётов ведет к сокращению необходимого для них времени, что, в свою очередь, положительно сказывается на сроках по определению соотношений сигнал/шум для помех, которые имеют случайные, изменяемые в определенные промежутки времени, характеристики. Это становится возможным за счёт накопления системой существующих результатов

© Васильченко Д.В., Пирогов А.А., Остроумов И.В., Антиликаторов А.Б., 2018

моделирования и составление на их основе статистических выводов. Методика принимает минимальный уровень сигнала по отношению к уровню помехи как искомое соотношение сигнал/шум при известных параметрах канала передачи информации полезного сигнала [1].

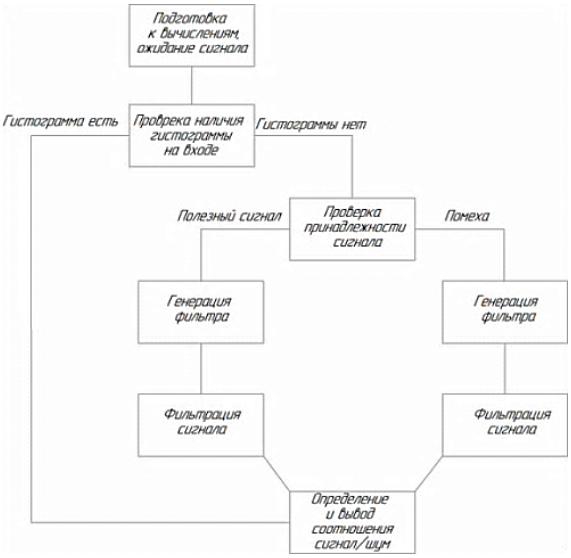


Рис. 1. Структурная схема методики

При такой реализации вероятность сбоя устройства под воздействием непрерывных радиопомех не превышает заданного значения. Общая структурная схема работы методики определения соотношения сигнал/шум представлена на рис. 1.

Схема состоит из 8 подсистем (блоков). Первый блок – блок подготовки к вычислениям и ожидания сигнала, в котором производится подстройка параметров обоих трактов (передающих и приёмных) под необходимые для получения результата значения сигнал/шум. В случае отсутствия начальной информации в качестве полосовых фильтров используются фильтры Баттерворта 2-го порядка.

В следующей подсистеме (поверка наличия гистограммы на входе) производится проверка наличия гистограмм помехи и сигнала, в случае, если обе гистограммы есть, система переходит к обработке и выводу результатов. Если же одна из двух либо обе гистограммы сразу отсутствуют, происходит выполнение следующего блока.

Блок, проверяющий принадлежность гистограммы к полезному сигналу или же помехе, производит выделение необходимого критерия, делая вывод о необходимости производить дальнейшие действия.

В схеме системы, отвечающей за обработку гистограмм с полезным сигналом (поступила гистограмма полезного сигнала), присутствуют два блока. Первый, называемый блоком генерации фильтра, производит генерацию амплитудно-частотной характеристики на входе манипулятора полезного сигнала, а также согласованного фильтра демодулятора и фильтра основной селекции приёмника. Далее происходит анализ сигнала и определение его к соответствующему тракту. Если сигнал относится к высокочастотному тракту, либо же к тракту промежуточной частоты, происходит коммутация двух соответствующих фильтров: фильтр на выходе манипулятора и фильтр, объединяющий фильтр основной селекции и согласованный фильтр приемника, или один – объединенный фильтр на выходе манипулятора и основной селекции приемника, второй – согласованный фильтр деманипулятора.

В четвертом блоке секции, относящейся к полезному сигналу, который называется блоком фильтрации полезного сигнала, происходит воспроизведение универсальной процедуры модулирования прохождения сигнала по каналу передачи информации. Здесь же происходит статистическая выборка параметров сигнала за определенные промежутки времени. К таким параметрам относится гистограмма откликов на полезный сигнал, а также вычисляемое среднее значение сигнала. При помощи быстрого преобразования Фурье определяется среднеквадратичное значение сигнала и на терминал выводится часть отклика на полезный сигнал на выходе согласованного фильтра деманипулятора.

Если на вход пришла помеха, то включаются следующие системы. Фильтр, генерируемый блоком генерации фильтра, схож с фильтром, применяемым в блоке работы с полезным сигналом. Единственное отличие его в том, что фильтр включается на входе помехи и после определении соотношения сигнал/шум по промежуточной частоте амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтра смещается на величину отстройки [2].

В заключительном блоке данной ветки происходят подобные блоку работы с полезным сигналом. Однако здесь гистограмма уровня отклика генерируется, принимая во внимание

несогласованность полезного сигнала и помехи по времени и фазе.

В конечном счёте, после отработки обеих систем, гистограмма переходит в заключительный блок, в котором происходит определение соотношения сигнал/шум для промежуточной и высокой частот. Впоследствии происходит вывод результатов в графиках полученных гистограмм.

Функционирование методики

Вычисление искомого соотношения сигнал/шум производится в соответствии с вышеуказанной последовательностью. На первом этапе вычисляются коэффициент необходимого изменения уровня помехи на основе свертки полученных гистограмм и поправка на разницу между среднеквадратичным значением помехи и среднеквадратичным значением полезного сигнала, полученной в соответствующих блоках [3]. После чего происходит суммирования полученных логарифмических коэффициентов. Сложение выполняется в соответствии с соотношением 1.

$$q_{сп} = \Delta p_{нс} + K_{П}. \qquad (1)$$

Далее происходит определение оценки вероятности превышения отклика помех над уровнем отклика на полезный сигнал на входе решающего устройства ($p_{пр}$) по уже полученным сверткам гистограмм при текущем отношении сигнал/помеха по соотношению 2.

$$p_{пр} = \sum_{i=1}^{N_g} \left(g_i^c \sum_{j=i}^{N_g} g_j^n \right), \qquad (2)$$

где Ng – количество точек/столбцов сформированных в одном масштабе гистограмм откликов на полезный и мешающий сигналы;

g_i^c - значение i-й точки гистограммы откликов на полезный сигнал;

g_j^n - значение j-й точки гистограммы откликов на мешающий сигнал.

Оценка вероятности неправильного приёма сигнала из-за воздействия помехи производится в случае, если вычисленное превышение ведет к сбою при несовпадении знаков отклика. Необходимое изменение уровня помехи для получения заданной вероятности сбоя $p_{пр}$ определяется путем смещения гистограмм относительно друг друга. Пока эта вероятность сбоя меньше заданного уровня, гистограмма помехи смещается на один шаг вправо (от нуля), что соответствует увеличению среднеквадратичного уровня помехи на 0.25 дБ. Затем начинается другой цикл: пока вероятность сбоя больше заданного уровня, гистограмма помехи смещается на один шаг влево (к нулю), что соответствует уменьшению среднеквадратичного уровня помехи на 0.25 дБ. В результате получаем с точностью до 0.25 дБ коэффициент $\Delta p_{нс}$, определяющий, на сколько требуется изменить отношение сигнал/помеха, полученное после моделирования прохождения сигналов, для достижения требуемой вероятности сбоя символа. Шаг 0.25 дБ накладывает соответствующее ограничение на точность результата определения защитного отношения (ЗО), однако это ограничение не является принципиальным и при наличии потребности в получении результата с большей точностью шаг дискретизации гистограмм может быть уменьшен.

На примере, указанном на рис. 2, показаны полученные с помощью разработанной программной реализации методики результаты определения соотношения сигнал/шум для приемника сигнала BPSK с использованием DSS, определяемого спецификациями стандарта 802.11. Данный тип сигналов довольно распространен и используется большим количеством РЭС для обеспечения беспроводной связи. Полученное значение минус 3 дБ существенно отличается от значений, сопоставляемых данных классов РЭС по Таблице защитных отношений [3], согласно которой для радиорелейных линий соотношения сигнал/шум с помехой аналогичной структуры составляет 24 дБ, для РЭС прямой радиосвязи – 18 дБ. Если же учесть, что кадр физического уровня стандарта 802.11 является отдельным импульсом с заданной формой переднего и заднего фронтов со скважностью близкой к 1, то значение соотношения сигнал/шум уменьшается на 10 дБ (до 14 и 8 дБ соответственно).

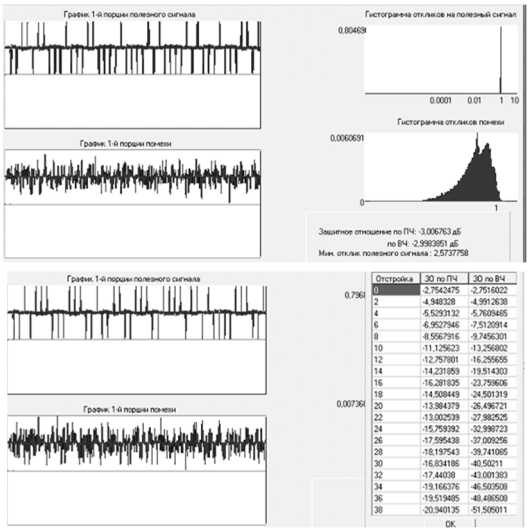


Рис. 2. Единократное определение соотношения сигнал/шум при заданных параметрах

Результатами работы программы являются графики сигналов, определение соотношения сигнал/шум и вывод на его основе защитного отношения для РЭС. Всё это возможно без проведения натуральных испытаний готового устройства. Все это снижает временные затраты на определение значений необходимых соотношений для последующей отстройки радиоэлектронных помех, имеющих случайные характеристики, меняющиеся с течением времени, путём накопления и анализа статистических результатов.

Заключение

Описанное методическое обеспечение позволяет решать задачи, связанные с организацией мер обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств различных систем связи, использующих фазоманипулированные сигналы. Данная методика расчета соотношения сигнал/шум, а также выведение защитных отношений разработаны для приемников фазоманипулированных сигналов различной сложности. Такие приёмники используют разнообразную форму огибающей элементарной посылки, а также сигналов модулированных минимальным сдвигом. Сама модель основывается на использовании приёма, имитирующего помеховое воздействие на систему связи фазоманипулированными сигналами, позволяющая определять защитное значение для высокочастотных трактов, а также для промежуточной частоты, для различных видов импульсных и непрерывных радиопомех.

Литература

1. Кремер И.Я., Владимиров В.И., Карпухин В.И. Модулирующие (мультипликативные) помехи и прием радиосигналов. М.: Сов. Радио, 1972.

2. Владимиров В.И., Докторов А.Л. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем; под ред. Н.М. Царькова. М.: Радио и связь, 1985.

3. Ромащенко, М.А. Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 4. С. 106-109.

Поступила 15.05.2018; принята к публикации 20.09.2018

Информация об авторах

Васильченко Дмитрий Владимирович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Shadow951@bk.ru

Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kipr@vorstu.ru

Остроумов Иван Владимирович – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kipr@vorstu.ru

Антиликаторов Александр Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kipr@vorstu.ru

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF METHODS FOR DEFINITION OF PROTECTIVE RELATIONS IN DEVICES USING DIFFERENT PRINCIPLES OF SIGNAL MODULATION

D.V. Vasil'chenko, A.A. Pirogov, I.V. Ostroumov, A.B. Antilikatorov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: currently, wireless electronics is booming. In particular, wearable gadgets that have recently used wired systems to communicate with various devices have introduced wireless communication channels as connecting elements of information transmission. These include a variety of peripherals, such as headphones, smart clocks, etc. All these channels operate at certain frequencies, which can be damped by the effects of various types of electromagnetic interference. These interferences adversely affect not only the reception of the signal, but also the receiving and transmitting devices themselves, as well as all electronic devices located in the interference zone. The article shows the technique of determining the signal-to-noise ratio and calculating the protective ratio by means of which it is possible to determine the protective ratio by the high-frequency path and at the intermediate frequency without carrying out tests that require large time and material costs. This technique is suitable for use in radioelectronic facilities using signals with phase, as well as frequency modulation, with respect to radio interference of various types. Such disturbances include impulse and continuous radio interference based on phase-manipulated signals, frequency-modulated signals and signals modulated in frequency by harmonic or saw-tooth voltage

Key words: radio electronic means, signal manipulation, wireless communication systems, signal-to-noise ratio, protective ratio

References

1. Kremer I.Ya., Vladimirov V.I., Karpukhin V.I. “Modulating (multiplicative) interference and reception of radio signals” (“Moduliruyushchie (mul'tiplikativnye) pomekhi i priyem radiosignalov”), Moscow, Sov. Radio, 1972.

2. Vladimirov V.I., Doktorov A.L.; ed. Tsar’kova N.M. “Electromagnetic compatibility of radioelectronic facilities and systems” (“Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv i sistem”), Moscow, Radio i Svyaz’, 1985.

3. Romashchenko M.A. “The main tasks of the analysis of the provision of EMC in the designs of RES and the principles of its implementation”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 106-109.

Submitted 15.05.2018; revised 20.09.2018

Information about the authors

Dmitriy V. Vasil’chenko, Student, Voronezh State Technical University 14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: Shadow951@bk.ru

Aleksandr A. Pirogov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru

Ivan V. Ostroumov, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru

Aleksandr B. Antilikatorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru

УДК 621.395.623.8

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ РУПОРНЫЙ АВТОМОБИЛЬНЫЙ САБВУФЕР

А.С. Бадаев, Д.К. Фомин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: предлагается методика расчета и разрабатывается конструкция рупорного автомобильного сабвуфера с высокой мощностью, КПД и максимальным уровнем звукового давления (SPL). Анализ частотных зависимостей активных составляющих входного сопротивления $R_{вх}$ рупоров различной формы, полученных в результате решения волнового уравнения Вебстера, показывает, что максимально эффективным при воспроизведении низких частот (НЧ) является рупор с гиперболическим профилем. В области НЧ вблизи критической частоты $f_{кр}$, определяющей нижнюю граничную частоту воспроизведения, максимальным значением $R_{вх}$ обладает гиперболический рупор. Это обеспечивает оптимальную, в случае согласования акустических сопротивлений, нагрузку для головок громкоговорителей (ГГ), установленных на входе рупора. При выполнении условия о сравнимости размеров периметра выходного отверстия рупора – “устья” с длиной волны, соответствующей $f_{кр}$, гиперболический рупор будет эффективно излучать акустическую энергию на НЧ. Использование в качестве нагрузки для задних сторон диффузоров ГГ фазоинвертора с пассивным излучателем (ПИ), работающего в фазе с излучением рупора, позволяет повысить SPL. На основе предложенной методики рассчитана и разработана конструкция рупорного автомобильного сабвуфера. Отмечены более высокие технические характеристики разработанного сабвуфера по сравнению с аналогами

Ключевые слова: акустические системы (АС), сабвуфер, рупор, фазоинвертор с пассивным излучателем (ПИ), мощность, КПД, SPL

Введение

С появлением новых цифровых форматов звукозаписи и повышением требований ко всем звеньям звуковоспроизводящего тракта для реализации их высоких параметров, проблема создания акустических систем (АС) с широчайшим динамическим диапазоном (до 125-130 дБ) и перегрузочной способностью становится чрезвычайно актуальной и очень не простой задачей. Кроме того, проблема представляет и прикладной интерес, заключающийся в создании автомобильного сабвуфера для участия в конкурсе по достижению максимального уровня звукового давления (SPL) в автомобильных аудиоустановках.

В связи с этим целью работы являлась разработка методики расчета гиперболического рупора, расчет и конструирование рупорного автомобильного сабвуфера с высокими мощностью, КПД и SPL.

До последнего времени повышение SPL достигалось увеличением мощности головок громкоговорителей (ГГ) и, соответственно, усилителей вплоть до 3-4 кВт , повышение SPL на 3 дБ требовало увеличение мощности в 2 раза. ГГ устанавливались в классические акустические оформления – “закрытый корпус”, ”фазоинвертор”, ”полосовой резонатор”, КПД которых не превышает 1-3%, тогда как КПД рупорных оформлений достигает 20% и больше [1-3]. Поэтому в настоящей работе при разработке конструкции сабвуфера выбрано рупорное акустическое оформление.

Методика расчета и выбор конструкции

Рупорный громкоговоритель (РГ) представляет собой устройство, в котором ГГ нагружена на вход рупора. Рупором называют трубу с постепенно возрастающим сечением. Входное отверстие рупора с меньшей площадью называют «горлом», выходное, с большой площадью, «устьем» (рис. 1).

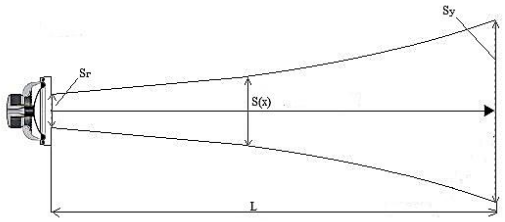


Рис. 1. Рупор

Размеры «устья» должны быть сравнимы с длиной волны колебаний самых низких воспроизводимых частот, что обеспечивает высокое, преимущественно активное сопротивление излучения $R_{изл}$ и отсутствие отражения звуковой волны от выходного отверстия. При этом рупор эффективно излучает звуковую энергию в окружающую среду. Небольшая площадь «горла» выбирается из расчета получения высокого активного входного сопротивления ру-

© Бадаев А.С., Фомин Д.К., 2018

пора, его согласования с механическим сопротивлением ГГ и обеспечения как можно более низкого уровня нелинейных искажений звукового сигнала [2]. На сегодняшний день не существует единого подхода к выбору формы рупора, применяют конструкции с различным законом изменения поперечного сечения: экспоненциальные, конические, рупора с трактрисой и т.д. Для описания волновых процессов и определения характеристик звукового поля в рупоре (линейных: звукового давления, колебательной скорости частиц среды, акустического сопротивления; энергетических: акустической мощности, интенсивности или силы звука и т.д.) следует рассмотреть решения волновых уравнений для рупоров различных конфигураций [4].

Одномерное волновое уравнение, так называемое волновое уравнение Вебстера, имеет вид

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{1}{S(x)}\cdot\frac{\partial S(x)}{\partial x}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}+k^2 p=0, \qquad (1)$$

где $p=p(x)e^{jwt}$ - переменное звуковое давление вдоль оси рупора; $S(x)$- площадь поперечного сечения вдоль оси рупора; $k=\omega/$- волновое число; ω-круговая частота звуковых колебаний ; c- скорость звука в воздухе.

В случае гиперболического рупора площадь поперечного сечения возрастает по закону

$$S(x)=S_{\Gamma}\left(ch\frac{\beta x}{2}+ash\frac{\beta x}{2}\right)^2, \qquad (2)$$

где S_{Γ} - площадь "горла" рупора; $ch\frac{\beta x}{2}=\frac{e^{\frac{\beta x}{2}}+e^{-\frac{\beta x}{2}}}{2}; sh\frac{\beta x}{2}=\frac{e^{\frac{\beta x}{2}}-e^{-\frac{\beta x}{2}}}{2}$ - гиперболические косинус и синус соответственно; β - коэффициент расширения рупора, определяющий относительное изменение площади сечения при изменении осевой длины на единицу; x- координата вдоль оси рупора.

$$\beta=\frac{4\pi f_{кр}}{c}\ [4], \qquad (3)$$

где $f_{кр}$, - критическая частота, определяющая нижнюю граничную частоту, пропускаемую рупором $f_{гр}$; с - скорость звука в воздухе.

При а=0 получаем рупор с профилем гиперболического косинуса (катеноидальный рупор), при а=1 - экспоненциальный рупор. В этом случае волновое уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}+\frac{2}{x}\cdot\frac{sh\frac{\beta x}{2}+ach\frac{\beta x}{2}}{ch\frac{\beta x}{2}+ash\frac{\beta x}{2}}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}+k^2 p=0. \qquad (4)$$

Решением уравнения (4) будет

$$P(x)=\frac{1}{ch\frac{\beta x}{2}+ash\frac{\beta x}{2}}\cdot$$

$$\cdot\left[A_1 e^{j\left(-kx\sqrt{1-\frac{\beta^2}{4k^2}}\right)}+A_2 e^{j\left(kx\sqrt{1-\frac{\beta^2}{4k^2}}\right)}\right], \qquad (5)$$

где A_1 и A_2 - амплитуды звукового давления прямой и отраженных волн соответственно.

После умножения на $e^{j\omega t}$ решение принимает вид:

$$P(x,t)=\frac{1}{ch\frac{\beta x}{2}+ash\frac{\beta x}{2}}\cdot$$

$$\left[A_1 e^{j\left(\omega t-kx\sqrt{1-\frac{\beta^2}{4k^2}}\right)}+A_2 e^{j\left(\omega t+kx\sqrt{1-\frac{\beta^2}{4k^2}}\right)}\right]. \qquad (6)$$

Пренебрегая отражением от "устья" - выходного отверстия рупора (случай бесконечного рупора), получим

$$P(x,t)=\frac{A_1}{ch\frac{\beta x}{2}+ash\frac{\beta x}{2}}\cdot e^{j\left(\omega t-kx\sqrt{1-\frac{\beta^2}{4k^2}}\right)}. \qquad (7)$$

Среднее значение $\overline{p}$ и колебательной скорости $\overline{\upsilon}$ будут[4]:

$$\overline{P}=\rho\frac{\partial p}{\partial t}=\frac{j\omega\rho A_1}{ch\frac{\beta x}{2}+ash\frac{\beta x}{2}}\cdot e^{j\left(\omega t-kx\sqrt{1-\frac{\beta^2}{4k^2}}\right)}, \qquad (8)$$

где ρ - плотность воздуха.

$$\overline{\upsilon}=-\frac{j}{k\rho c}\cdot\frac{\partial p}{\partial x}. \qquad (9)$$

Входное сопротивление рупора при x=0 ;

$$\dot{Z}_{вх}=\frac{\overline{P}(0)}{\overline{\upsilon}(0)}=\frac{\rho c S_{\Gamma}}{\sqrt{1-\frac{\beta^2}{4k^2}}-j\frac{a\beta}{2k}}. \qquad (10)$$

Разделяя действительную и мнимую часть, получим:

$$\dot{Z}_{вх} = \rho c S_{Г} \left[\frac{\sqrt{1-\frac{\beta^2}{4k^2}}}{1+\frac{\beta^2}{4k^2(a^2-1)}} + j \frac{\frac{a\beta}{2k}}{1+\frac{\beta^2}{4k^2(a^2-1)}} \right] =$$

$$= R_{вх} + jX_{вх} . \qquad (11)$$

Частотные зависимости активной составляющей $\dot{Z}_{вх}$ для 2-х предельных случаев, при a=0 - гиперболический, при a=1 экспоненциальный рупор, представлены на рис. 2.

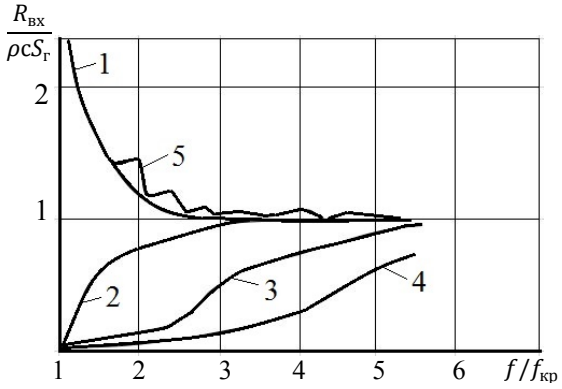


Рис. 2. Частотные зависимости активной составляющей входного сопротивления различных рупоров:
1 - гиперболический; 2 - экспоненциальный;
3 - конический; 4 - параболический; 5 - гиперболической конечной длины

Кроме того для сравнения также показаны аналогичные кривые для конического и параболического рупоров [4]. Сравнительный анализ приведенных результатов показывает, что в области низких частот вблизи $f_{кр}$ максимальным значением $R_{вх}$ обладает гиперболический рупор. Это обеспечивает оптимальную в случае согласований сопротивлений нагрузку ГГ, установленной на входе рупора. При выполнении условия о сравнимости размеров периметра "устья" с длиной волны, соответствующей $f_{кр}$, гиперболический рупор будет максимально эффективно излучать акустическую энергию на низких частотах по сравнению с рупорами других профилей. В реальных конечных рупорах наблюдается отражение звуковой волны от "устья", что приводит к возникновению в рупоре стоячих волн, вследствие чего частотная характеристика $R_{вх}$ и АЧХ по звуковому давлению имеет волнообразный вид (кривая 5 на рис. 2). Для выравнивания АЧХ следует покрывать стенки рупора, особенно вблизи "горла", звукопоглощающим материалом. По данным работы [4] , нелинейные искажения в гиперболическом рупоре будут выше чем в других рупорах из-за самой высокой скорости его раскрыва. Поскольку при измерениях SPL на автоконкурсах нелинейные искажения не нормируются, при разработке конструкции автомобильного сабвуфера мы остановили свой выбор на гиперболическом рупоре.

Описание конструкции

С применением подхода, использованного при разработке экспоненциальных рупорных АС [2], и метода расчета фазоинвертора [1], была рассчитана и разработана конструкция рупорного автомобильного сабвуфера, схема которого представлена на рис. 3, установка в автомобиль - на рис. 4.

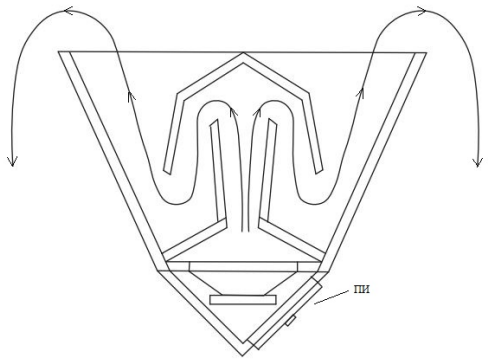


Рис. 3. Схема рупорного автомобильного сабвуфера

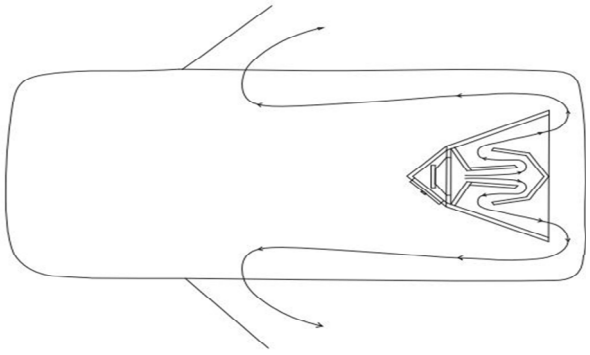


Рис. 4. Расположение сабвуфера в салоне автомобиля

В конструкции использованы 2 профессиональные НЧ ГГ, включенные параллельно, B&C Speaker12nw76, выбор которых в первую очередь был обусловлен рекордным уровнем характеристической чувствительности. Параметры каждой ГГ следующие: номинальная мощность – 500 Вт; максимальная мощность – 1000 Вт; уровень характеристической чувствительности – 99 дБ; собственная резонансная частота - 38 Гц; полная добротность - 0.2; эквивалентный объем 75 дм³; номинальное сопротивление - 4 и 8 Ом; диаметр – 32 см; площадь диффузора – 550 см². Передние стороны диф-

фузоров ГГ нагружены на свёрнутый рупор через предрупорную камеру, согласующую входное сопротивление рупора с механических сопротивлением ГГ. Задние стороны работают на фазоинвертор с пассивным излучателем (ПИ) [1], установленном в компрессионной камере. ПИ представляет собой диск из алюминиевого сплава на гибком подвесе, частота его настройки регулируется с помощью дополнительных грузов, размещенных в центре диска. Важно отметить, что салон автомобиля является частью рупорного акустического оформления и формирует вместе с боковыми стенками продолжение рупора, расширяющегося по гиперболе, а открытые передние двери позволяют достичь расчетной величины площади "устья" $S_{\text{у}}$ и продлить рупор. Рассчитанные параметры рупора следующие: $f_{\text{гр}} = f_{\text{кр}} = 58\text{Гц}$; $V_{\text{кк}} = 60\text{дм}^3$; $V_{\text{пк}} = 6\text{дм}^3$;$S_{\text{Г}} = 450\text{см}^2$; $S_{\text{у}} = 2.2\text{м}^2$; длина рупора - 2,4м. Параметры фазоинвертора: $V_{\text{кк}} = 60\ \text{дм}^3$; диаметр ПИ – 30 см; площадь ПИ – 700 см²; частота настройки 32-45 Гц; масса ПИ – 180 г; гибкость подвеса ПИ - $6 \cdot 10^{-5}\text{м/н}$.

Звуковая волна, излучаемая передними сторонами диффузоров, проходит путь до ПИ, и точки прослушивания или измерения SPL у переднего сидения, равный примерно половине длины волны, соответствующей $f_{\text{кр}}$ (~3м). Учитывая, что ПИ на частоте настройки фазоинвертора работает почти в фазе с передними сторонами, то результирующее звуковое давление должно возрасти. Все эти соображения необходимо учитывать при разработке сабвуферов под конкретные кузова (желательно большие и очень прочные).

Требования к корпусу сабвуфера максимально жёсткие: он должен быть прочным, жёстким и герметичным. Толщина стенок зависит от применяемых материалов, в случае использования берёзовой фанеры (лучше авиационной) их толщина должна быть не менее 3 см. Лучше использовать несколько слоев, склеенных клеем или компаундом, сохраняющими вязкость для поглощения вибраций корпуса и перегородок, обязательно применение усиливающих стяжек и ребер жёсткости. Объемы предрупорной и компрессионной камер частично заполнены звукопоглощающим материалом, внутренние стенки и перегородки рупора также покрыты звукопоглотителем. Снаружи корпус покрыт декоративным звукопоглощающим материалом - "карпетом", желательно, чтобы салон автомобиля тоже был отделан этим материалом.

Основные технические характеристики. Заключение

Основные технические характеристики установленного в автомобиле сабвуфера: номинальная мощность 1000 Вт; максимальная мощность – 2000 Вт; номинальное электрическое сопротивление - 2 и 4 ом; диапазон воспроизводимых частот 25-500 Гц; расчетный уровень характеристической чувствительности 118 дБ; расчетный SPL при номинальной подводимой мощности – 150 дБ [5]; габариты: высота – 76 см; ширина и глубина – 82 см; масса - не менее 40 кг.

По большинству параметров разработанное устройство превосходит аналоги, с другой стороны, рупорные автомобильные сабвуферы нам неизвестны.

Помимо автоустановок модификации сабвуфера с успехом могут быть использованы в качестве АС низкочастотной поддержки при озвучивании больших кино- и концертных залов, стадионов и открытых пространств.

Литература

1. Электроакустика и звуковое вещание: учеб. пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологодин, А.П. Ефимов и др.; под ред. Ю.А. Ковалгина. М.: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. 872 с.

2. Бадаев А.С., Гукин Д.В. Высококачественная рупорная акустическая система // Проектирование радиоэлектронных и лазерных устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2011. С. 70-88.

3. Бадаев А.С. Полосовой громкоговоритель четвертого порядка // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2006. С. 273-276.

4. Beranek L.L., Mellow T.J. Acoustics: Sound Fields and Transducers. Oxford GB: Acedemic Press, 2012. 678 p.

5. Алдошина И.А., Войшвилло А.Г. Высококачественные акустические системы и излучатели. М.: Радиосвязь, 1985. 168 с.

Поступила 23.05.2018; принята к публикации 03.09.2018

Информация об авторах

Бадаев Андрей Станиславович – канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-952-553-86-63, e-mail: andrbad56@yandex.ru
Фомин Даниил Константинович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-950-775-10-12, e-mail: fom618@gmail.com

HIGHLY EFFICIENT HORNY AUTOMOBILE SUBWOOFER

A.S. Badaev, D.K. Fomin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper proposes a calculation technique and develops a horn car subwoofer design with high power, efficiency and maximum sound pressure level (SPL). The analysis of the frequency dependences of the active components of the input impedance R_{in} of the horns of different shapes obtained as a result of the solution of the Webster wave equation shows that the horn with a hyperbolic profile is the most effective for reproducing low frequencies (LF). In the low-frequency region near the critical frequency f_{cr}, which determines the lower limiting reproduction frequency, the hypervalent horn possesses the maximum value R_{in}. This provides the optimal load, in case of matching the acoustic impedances, for the loudspeaker heads (LH) installed at the input of the speaker. When the condition on the comparability of the perimeter dimensions of the horn output opening - "mouth" to a wavelength corresponding to f_{cr} is satisfied, the hyperbolic horn will effectively emit acoustic energy at the low frequency. Using a phase inverter with a passive radiator (PR) as a load for the rear sides of the diffusers of the GG, operating in a phase with the emission of the horn, allows to increase the SPL. Based on the proposed methodology, the design of a horned automotive subwoofer was designed and developed. The work shows higher technical characteristics of the developed subwoofer compared to analogues

Key words: acoustic systems (AS), subwoofer, speaker, bass reflex with passive radiator (PR), power, efficiency, SPL

References

1. Aldoshina I.A., Vologodin E.I. , Efimov A.P. et al., ed. Kovalgina Yu.A. “Electroacoustics and sound broadcasting: Manual” (“Elektroakustika i zvukovoe veshchanie: ucheb. posobie dlya vuzov”), Moscow, Goryachaya liniya-Telecom, Radio i Svyaz’, 2007, 872 p.

2. Badaev A.S., Gukin D.V. “High-quality horn acoustic system”, *Designing of radio-electronic and laser devices and systems: interuniversity collected papers (Proektirovanie radio-elektronnykh i lazernykh ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, VSTU, 2011, pp.70-88

3. Badaev A.S. “Fourth-order strip loudspeaker”, *Problems of assurance of reliability and quality of instruments, devices and systems: interuniversity collected papers (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem: mezhvuz. sb. nauch. tr.),* Voronezh, VSTU, 2006, pp. 273-276.

4. Beranek L.L., Mellow T.J. “Acoustics: sound fields and transducers”, Oxford, GB, Acedemic Press, 2012, 678 p.

5. Aldoshina I.A., Voyshvillo A.G. “High-quality acoustic systems and radiators” (“Vysokokachestvennye akusticheskie sistemy i izluchateli”), Moscow, Radio i Svyaz’, 1985, 168p.

Submitted 23.05.2018; revised 03.09.2018

Information about the authors

Andrey S. Badaev, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-952-553-86-63, e-mail: andrbad56@yandex.ru
Daniil K. Fomin, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-950-775-10-12, e-mail: fom618@gmail.com

Машиностроение и машиноведение

УДК 53.072:621.791.4

ТОПОГРАФИЯ, ХИМИЧЕСКИЙ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ДИФФУЗИОННО-СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В.В. Пешков[1], А.Б. Булков[1], С.Б. Кущев[1], Б.Л. Агапов[2], А.И. Донцов[2], С.В. Канныкин[2]

[1] Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия
[2] Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

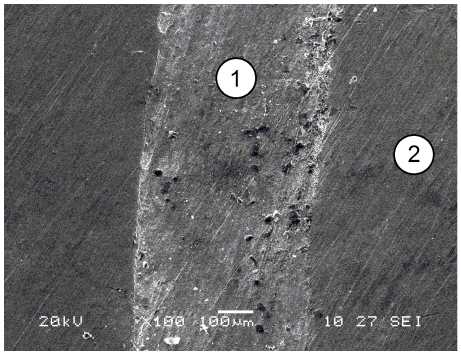
Аннотация: экспериментальные исследования проводили на трубчатых образцах с толщиной стенки $\delta_з$=0,5 мм из сплава ОТ4 (имитирующих одну ячейку сотового заполнителя слоистого композита), к торцу которых привариваали пластины толщиной $\delta_о$ от 0,5 до 2 мм, из листового сплава ОТ4–1 (имитирующие несущие слои композита). Диффузионную сварку проводили при температуре 900 °С, сжимающем давлении 2,8 МПа в вакууме 2,6 Па в течение времени до 60 мин. Сварные соединения испытывали на отрыв, затем проводили исследование поверхностей разрушения. Анализ топографии поверхностей разрушения показывает, что $\delta_о$ при менее 1,5 мм разрушение соединения происходило по плоскости контакта свариваемых поверхностей с формированием слаборазвитых очагов схватывания, при этом на фрактограммах присутствуют фрагменты пленочных включений. Результаты рентгеноспектрального микроанализа, рентгеновской дифрактометрии и Оже-спектроскопии поверхностей разрушения выявляют достаточно высокое содержание кислорода в поверхностных слоях и дают основание считать, что присутствующие в контакте свариваемых заготовок субоксидные пленки являются существенным барьером для реализации процесса сварки. Установлено, что образование сварного соединения происходит в процессе деформации контактных поверхностей, необходимой для разрушения субоксидов и активации свариваемых поверхностей

Ключевые слова: диффузионная сварка, зона контакта, деформация, очаги схватывания, фрактография

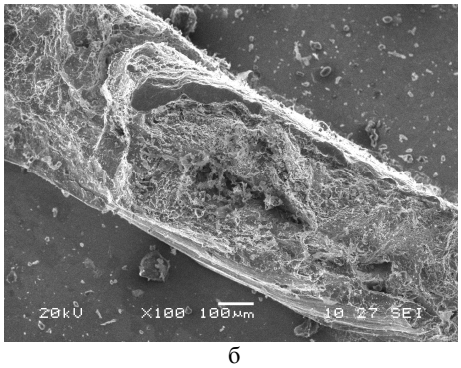
Введение

В работе [1] на образцах, имитирующих элемент тонкостенной конструкции с тавровым соединением, было установлено, что образование диффузионного соединения и его прочность обусловлены развитием процесса деформации в зоне контакта, характеризуемой глубиной вдавливания ε трубчатого образца с толщиной стенки 0,5 мм в поверхность плоской привариваемой пластины.

Анализ поверхностей пластин (рис. 1) показал, что для образования контакта между полированными поверхностями свариваемых заготовок достаточно деформации ε_k порядка 0,01 мм (рис. 1, а), но при этом прочность диффузионного соединения $\sigma_в$ практически равняется нулю [1]. По мере развития ε качество соединения повышается и для получения соединения, разрушение которого при механических испытаниях происходит по основному металлу (рис. 1, б) требуется деформация $\varepsilon_{св}$ на порядок большая, чем ε_k ($\varepsilon_{св}$=0,08…0,1 мм) [1].



а



б

Рис. 1. Топография поверхностей разрушения сварного соединения, полученного при t=900 °С; p=2,8 МПа; τ=10 мин и величине деформации в зоне контакта: а – 0,01; б – 0,09 (места анализа поверхностей образцов: 1 – сварной шов, 2 – “свободная” поверхность)

Ответ на вопрос, чем обусловлена столь большая разница между ε_k и $\varepsilon_{св}$, представляю-

© Пешков В.В., Булков А.Б., Кущев С.Б., Агапов Б.Л., Донцов А.И., Канныкин С.В., 2018

щий не только научный, но и значительный практический интерес, связан с проведением дополнительных исследований топографии и физико-химического состояния поверхностей разрушения сварных соединений, выполненных в рамках работы [1].

Поэтому данная работа является продолжением [1] и приведенные ниже исследования следует рассматривать в комплексе с результатами [1].

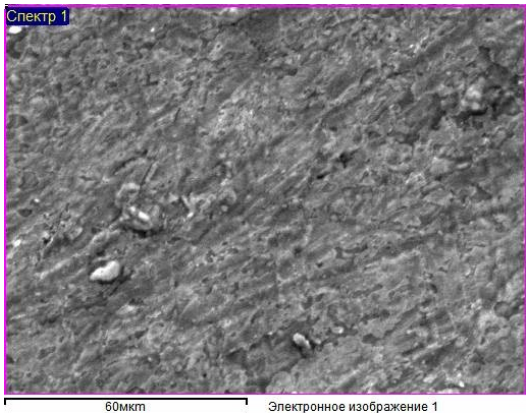
Результаты исследований

Результаты фрактографических исследований поверхностей разрушения соединений, полученных при одном и том же режиме (t=900 °С; p=2,8 МПа, разрежение воздуха 2,6 Па, время τ=10…60 мин.), но при различной толщине привариваемых заготовок и, как следствие этого, различной величине деформации в зоне контакта ε [1], приведены на рис. 2 - 5.

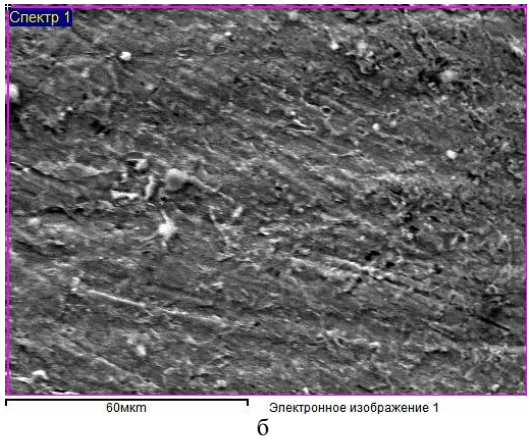
Строения изломов поверхностей разрушения характеризуются значительной неоднородностью, обусловленной степенью развития процесса образования диффузионного соединения. При этом наблюдается корреляция между топографией поверхностей разрушения, величиной деформации в зоне контакта и прочностью соединения [1].

Так при δ_o=0,5 мм, когда после сварки ε не превышало 0,01 мм и $\sigma_в$=0, на фрактограммах контактных поверхностей выявляются только включения в виде пленок (рис. 2). Увеличение длительности сварки от 10 до 60 мин. сопровождалось незначительным утонением пленок и частичным проявлением металлических поверхностей (темные участки на рис. 2, г).

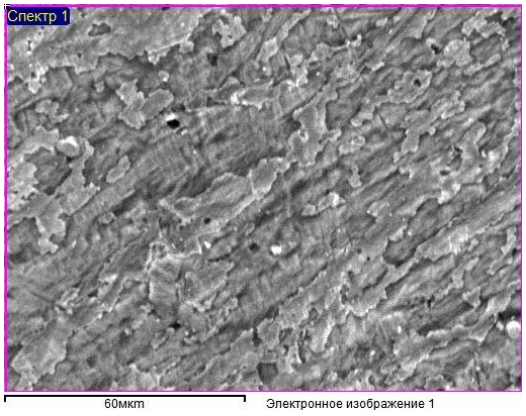
При δ_o от 0,8 до 1,0 мм величина деформации достигает 0,03…0,06 мм (рис. 3, 4), на участках поверхностей разрушения наряду с пленочными включениями присутствуют слаборазвитые очаги схватывания в виде мелких гребней отрыва, количество и размеры которых с увеличением длительности сварки и сопутствующей ей деформации увеличиваются (рис. 4, г).



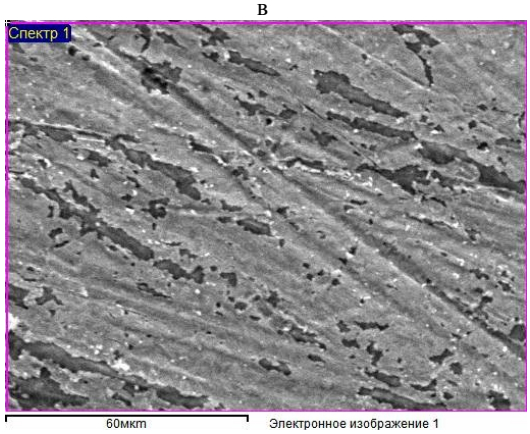
а



б

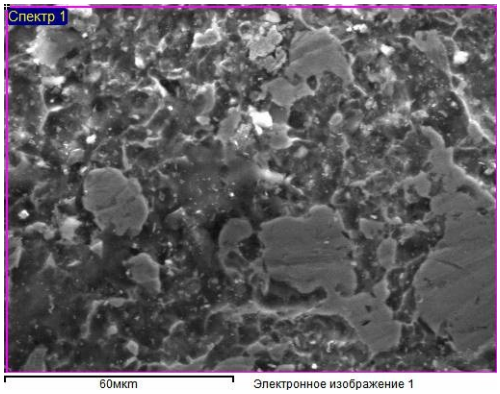


в

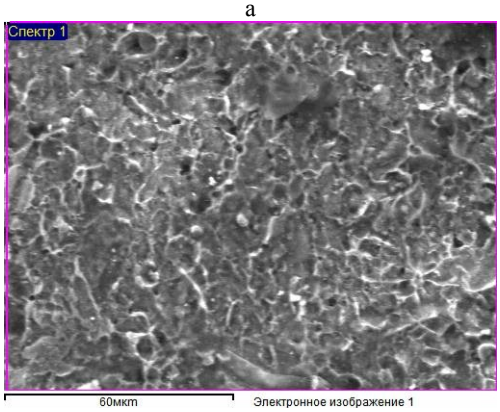


г

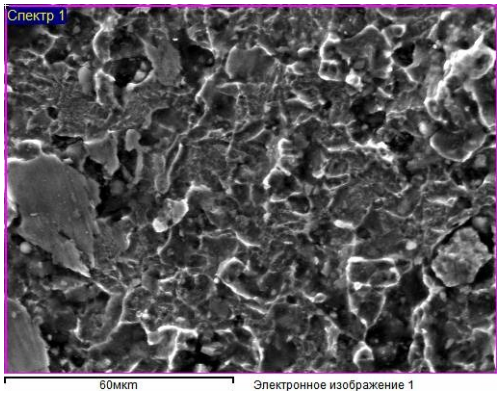
Рис. 2. Топография поверхностей разрушения соединения для пластины δ_o=0,5 мм после сварки в течение τ, мин.: а – 10; б – 20; в – 30; г – 60 и ε=0,01 мм; $\sigma_в$=0 [1]



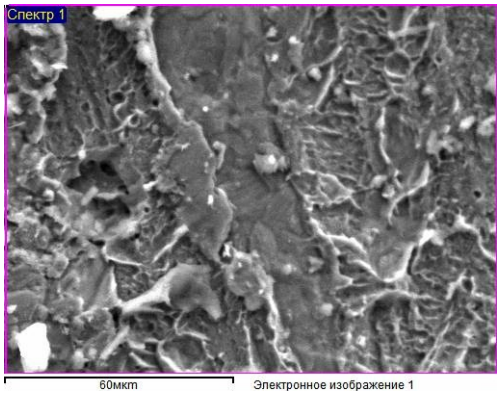
а



б

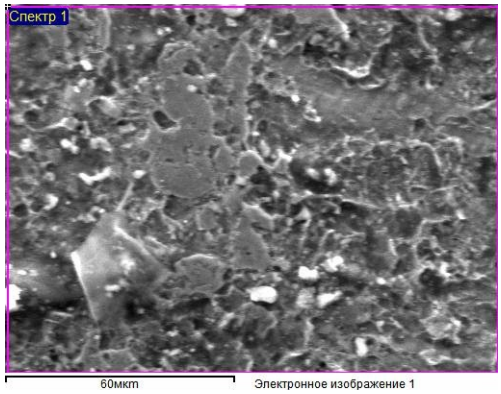


в

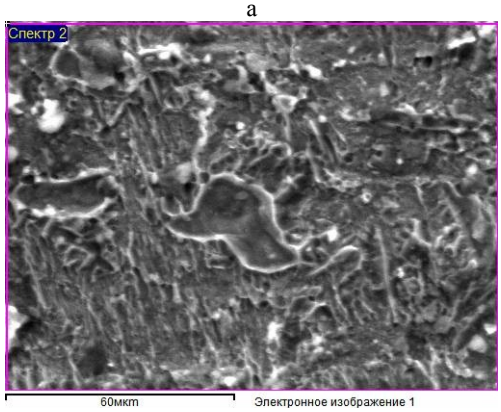


г

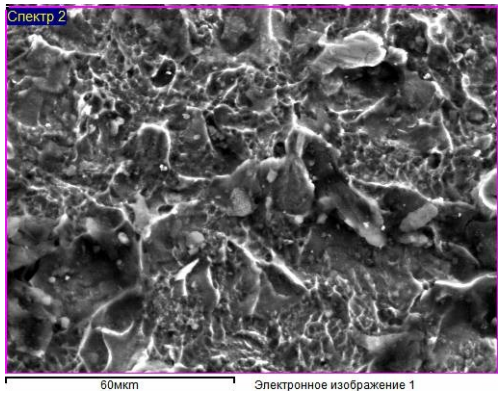
Рис. 3. Топография поверхностей разрушения соединения для пластины δ_o=0,8 мм после сварки в течение времени τ, мин.: а – 10; б – 20; в – 30; г – 60 и соответственно ε, мм: а – 0,03; б – 0,035; в – 0,038; г – 0,04 и $\sigma_в$, МПа: а – 120; б – 170; в – 170; г – 180 [1]



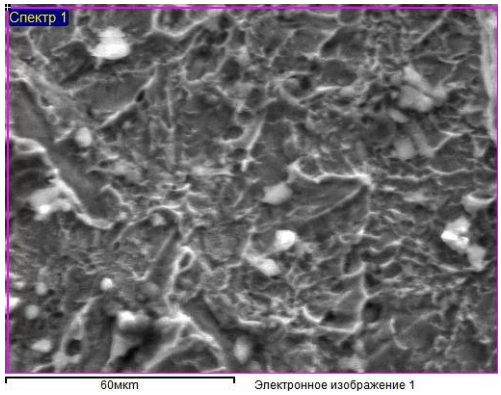
а



б



в



г

Рис. 4. Топография поверхностей разрушения соединения для пластины δ_o=1,0 мм после сварки в течение времени τ, мин.: а – 10; б – 20; в – 30; г – 60 и соответственно ε, мм: а – 0,045; б – 0,056; в – 0,06; г – 0,062 и $\sigma_в$, МПа: а – 180; б – 255; в – 300; г – 360 [1]

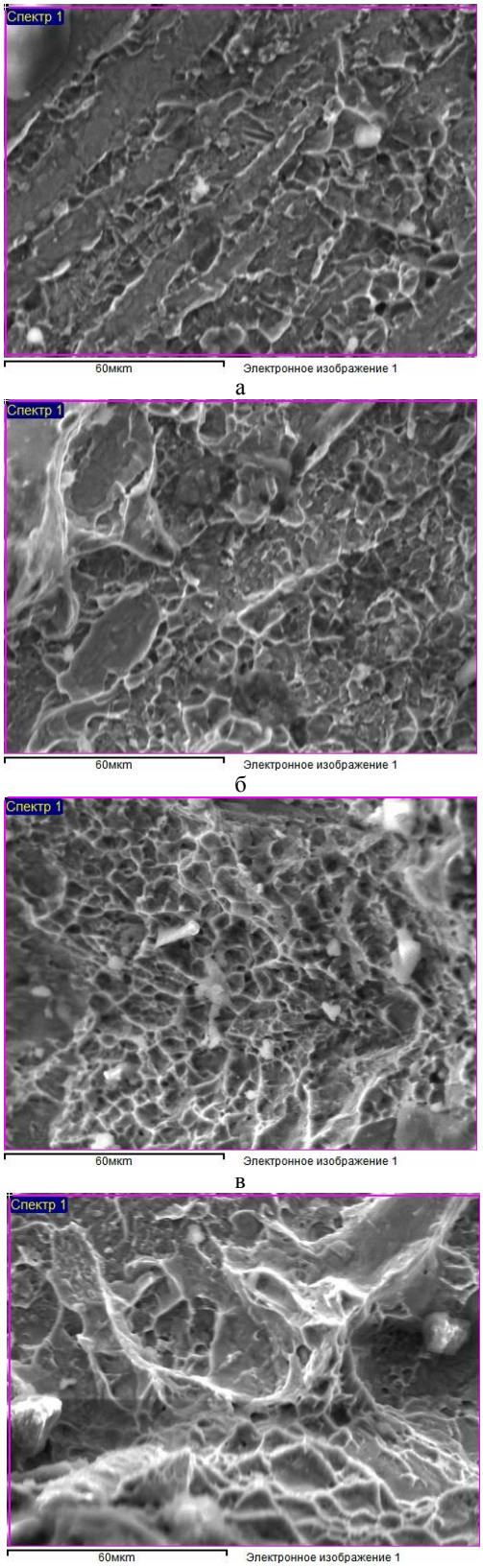


Рис. 5. Топография поверхностей разрушения соединения для пластины δ_o=1,5 мм после сварки в течение времени τ, мин.: а – 10; б – 20; в – 30; г – 60 и соответственно ε, мм: а – 0,07; б – 0,085 и $\sigma_в$, МПа: а – 420; б –500; в – 560; г – 600 [1]

На рис. 5 приведены фрактограммы поверхностей разрушения сварных соединений при использовании пластин толщиной 1,5 мм. Отличительной особенностью таких поверхностей является распространение трещины при разрушении как в плоскости контакта (рис. 5, а-в), так и по основному металлу (рис. 5, г). На поверхностях изломов при τ=10 мин. присутствуют пленочные включения, чередующиеся с гребнями отрыва (рис. 5, а), переходящие при $\tau \geq 20$ мин. в мелкоямочный рельеф, формирование которого происходит в результате развития и слияния микронесплошностей, расположенных в плоскости контакта (рис. 5, б, в). Увеличение длительности сварки до 60 мин. сопровождается образованием диффузионно-сварного соединения, которое при испытаниях разрушается по основному металлу с формированием типичного ямочного рельефа (рис. 5, г).

Одним из основных факторов, определяющих процесс формирования диффузионного соединения при сварке титана и его сплавов, является физико-химическое состояние контактных поверхностей, которое обусловлено не только предварительной обработкой (механической, химической и т.д.), но и их взаимодействием в процессе с компонентами разреженного воздуха, в первую очередь – с кислородом [2]. При этом в контактном зазоре между свариваемыми заготовками в результате развития автовакуумирования парциальное давление кислорода может значительно понижаться и могут даже создаваться условия для безокислительного нагрева и очистки контактных поверхностей от оксидов за счет растворения кислорода в металлической основе [3]. Степень понижения давления кислорода за счет автовакуумирования зависит от величины сечения контактного зазора, которое в рассматриваемом случае определяется толщиной свариваемых заготовок $\delta_з$. При малом сечении ($\delta_з$=0,5 мм) давление кислорода в контактном зазоре практически не будет отличаться от его значения в сварочной камере. Реально достижимое в сварочной камере разрежение воздуха не превышает 10^{-2} Па, при таких давлениях воздуха и температурах диффузионной сварки может происходить образование оксидов на поверхности титана и снижение их реакционной способности [2].

Для количественной оценки развития процесса окисления поверхностей образцов (см. рис. 1) был выбран метод рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), обладающий наибольшей точностью и достоверностью при решении данного класса задач. Рентгеноспектральные измерения проводились с помощью рентгеновского

спектрометра с дисперсией по энергии INCA-sight, используемого как приставка к растровому электронному микроскопу JSM-6380LV.

Вертикальный размер анализируемой области (глубина анализа) при выбранном ускоряющем напряжении электронного зонда (20 kV), рассчитанный в приближении Кастена [4], составлял 2,27 мкм. Планарный размер области анализа определялся размером растра на образце, т.е. увеличением электронного изображения. Масштаб изображения выводится в виде микронного маркера, присутствующего на каждом изображении.

Расчёт концентраций присутствующих в образцах химических элементов производился методом фи-ро-зет [5] с помощью аттестованной программы, разработанной фирмой Oxford Instruments Ltd. При анализе использовался набор эталонов фирмы Micro-Analysis Consultants Ltd, зарегистрированный в Международном Бюро Стандартов под номером 2768.

Результаты РСМА поверхностей изломов диффузионных соединений после механических испытаний (рис. 2 - 5) приведены в табл. 1. Анализ результатов показывает, что с увеличением длительности сварки от 10 до 60 мин. проявляется слабая тенденция к уменьшению концентрации кислорода на поверхностях разрушения диффузионных соединений, что может быть связано с развитием процесса диффузии кислорода в металлической основе после образования физического контакта (при $\tau \geq 10$ мин.). В то же время толщина свариваемых заготовок не оказывает заметного влияния на содержание кислорода на поверхностях изломов.

Если предположить, что весь кислород, находящийся на поверхности разрушения сварных соединений (табл. 1), прореагировал с титаном и образовал соединение Ti_nO, то, учитывая концентрацию титана на поверхности разрушения, можно дать количественную оценку показателя n по формуле

$$n = Ti/O,$$

где Ti и O – содержание титана и кислорода в атомных процентах.

Результаты вычисленных значений показателя n приведены в табл. 2. Его значения изменяются от 1,5 до 3,9, т.е. в зоне контакта свариваемых заготовок присутствуют субоксиды. При этом следует иметь в виду, что значения n занижены, т.к. при РСМА учитывается не только кислород, находящийся в виде химического соединения или твердого раствора в металлической основе, но и кислород, содержащийся в адсорбированных слоях газов и влаги, которые всегда присутствуют на поверхностях.

Таблица 1

Концентрация кислорода (ат. %) на поверхности разрушения диффузионного соединения в зависимости от длительности сварки (τ) и толщины привариваемой пластины (δ_o)

τ, мин.	δ_o, мм			
	1,5	1,0	0,8	0,5
10	32,65	34,18	34,95	31,18
20	33,20	31,70	28,55	31,30
30	25,20	30,67	28,66	25,49
60	23,60	23,01	21,30	24,45

Таблица 2

Значение показателя n в формуле Ti_nO в зависимости от длительности сварки (τ) и толщины привариваемых пластин (δ_o)

τ, мин.	δ_o, мм			
	1,5	1,0	0,8	0,5
10	1,5	1,8	1,7	1,6
20	1,8	1,7	2,25	2,01
30	2,7	2,06	2,3	2,3
60	2,9	3,2	3,9	2,9

Методами рентгеновской дифрактометрии (ARL X'TRA Thermo Techno) проведены исследования фазового состава поверхности в местах сварного шва. Установлено, что наряду с отражениями от Ti в районе 2Θ=39,8 ° присутствовал слабый максимум, который не принадлежал фазе титана (рис. 6).

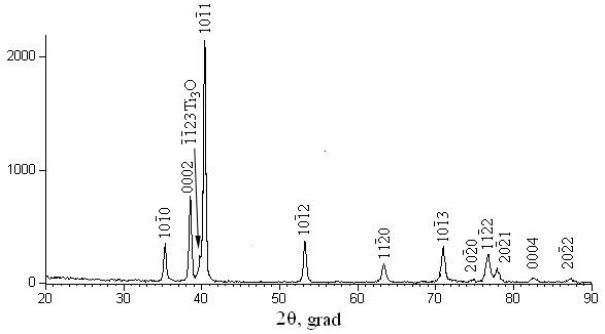


Рис. 6. Рентгеновская дифрактограмма с области сварного шва

Учитывая интенсивность отражений для различных оксидов титана и концентрацию элементов в области сварного шва, можно считать, что данный максимум, скорее всего, является отражением $\bar{1}\,\bar{1}23$ фазы Ti_3O или $\bar{1}\,\bar{1}22$ фазы Ti_6O (карточки данных фаз 01-072-1471, 01-076-1644) [6]. Отсутствие других отражений данных фаз, очевидно, связано с их малой интенсивностью по сравнению с этими отражениями. Малая интенсивность отражения свидетельствует о том, что количество данной фазы незначительно по сравнению с титаном.

Особого внимания заслуживают результаты анализа топографии (рис. 7) и химического состава «свободных» поверхностей пластин вне

площади контакта свариваемых заготовок (рис. 1, поз. 2).

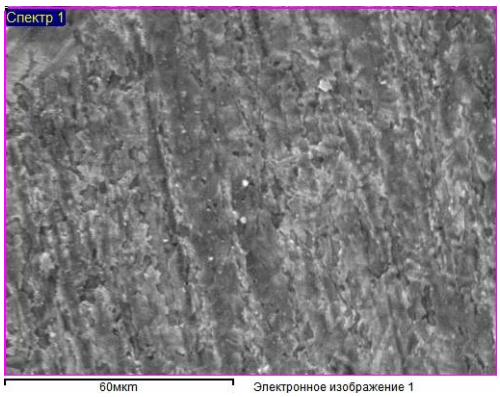
Концентрация кислорода на этих участках значительно ниже, чем на изломах, сформировавшихся после разрушения сварных соединений (см. табл. 1, рис. 2 - 5) и с увеличением времени сварки уменьшается вплоть до нуля. Осредненные значения концентрации кислорода по результатам 4 анализов при времени сварки 10, 20, 30 и 60 мин. составили соответственно 3,46; 0,78; 1,04 и 0,0 ат. %.

Рентгеновская дифрактометрия показала, что для поверхностей пластин, расположенных вне площади контакта (рис. 1, поз. 2), все отражения на рентгеновской дифрактограмме соответствовали фазе Ti с гексагональной решеткой (карточка 01-089-5009 C [6]).

Установленное различие по концентрации кислорода на участках 1 и 2 пластины (рис. 1) подтверждается и результатами Оже-спектроскопических исследований, выполненных на спектрометре ЭСО-3 с анализатором энергии DESA100 с послойным ионным травлением образцов. Проведенные исследования показали, что концентрация кислорода на участках сварного шва значительно выше, чем на участках свободной поверхности: ~33 ат.% и ~10 ат.% соответственно (рис. 8).

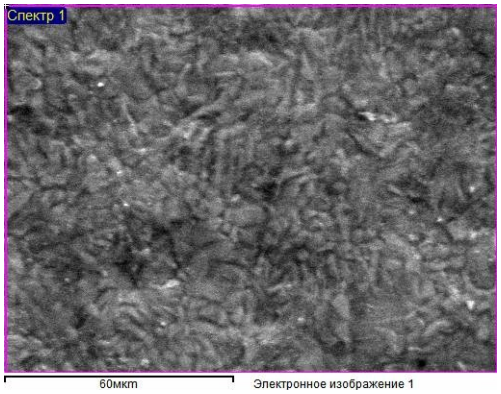
Полученные результаты РСМА и Оже-спектроскопии дают основание утверждать, что на «свободных» поверхностях вне зоны контакта процесс понижения концентрации кислорода за счет его растворения в металлической основе развивается значительно эффективнее, чем на поверхностях, находящихся в контакте.

Этот эффект может быть связан с высокой термической стабильностью тонких слоев субоксидов, формирующихся по границе между свариваемыми заготовками, характеризуемой значительной дефектностью.

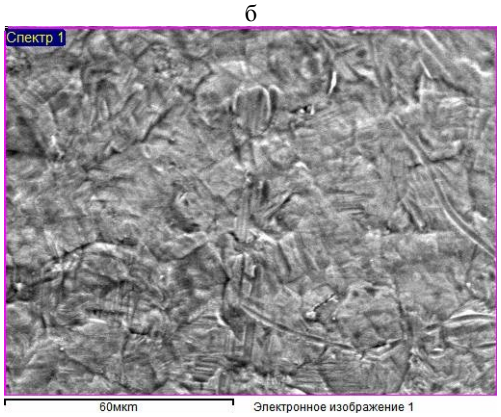


а

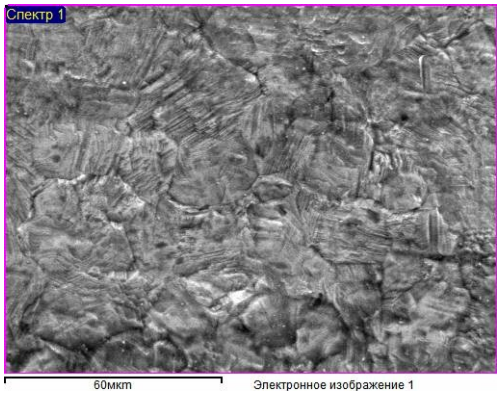
Рис. 7. Типичные виды топографии поверхностей пластин δ_o=1,0 мм на участках вне зоны соединения (рис. 1, поз. 2) после термического цикла сварки при t=900 °С и времени τ, мин.: а – 10; б – 20; в – 30; г – 60



б



в



г

Рис. 7. Типичные виды топографии поверхностей пластин δ_o=1,0 мм на участках вне зоны соединения (рис. 1, поз. 2) после термического цикла сварки при t=900 °С и времени τ, мин.: а – 10; б – 20; в – 30; г – 60
(продолжение)

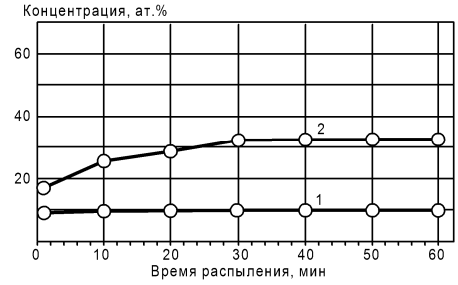


Рис. 8. Концентрационные профили кислорода для различных поверхностей образца после цикла сварки в течение 60 мин.: 1 – «свободная», 2 – сварной шов; общая глубина распыления ~0,5 мкм

Другим вариантом объяснения наблюдаемого эффекта может быть следующий. При температурах эксперимента (900 °С) титан характеризуется низким давлением насыщенного пара. Но каким бы малым оно не было, количество металла, переходящего в газовую фазу, прямым образом связано с объемом, в который он может переходить. При этом чем больше пространство, в которое может идти испарение, тем большее количество атомов выйдет из металла до установления равновесия «металл – пар». В свою очередь, чем больше испарится металла, тем больше будет разуплотнена кристаллическая решетка титана и тем больше будет возможность для реализации диффузионных процессов в металлической основе.

В пользу этой гипотезы свидетельствуют и результаты, приведенные на рис. 7, из которых следует, что по мере увеличения длительности сварки на поверхностях (вне зоны контакта свариваемых заготовок) формируется специфический микрорельеф, связанный с развитием процесса сублимации титана и так называемого термического травления [7].

Выводы

1. Фрактографическими исследованиями поверхностей изломов сварных соединений выявлено присутствие в зоне разрушения фрагментов пленочных включений, размеры которых с увеличением деформации ε уменьшаются.

2. Рентгеноспектральным микроанализом и Оже-спектроскопическими исследованиями поверхностей свариваемых заготовок установлено, что в условиях проведенных экспериментов на «свободных» участках поверхностей (находившихся вне контакта свариваемых заготовок) развивается процесс понижения концентрации кислорода вплоть до полного его растворения, в то время как на свариваемых поверхностях после образования физического контакта формируются субоксиды Ti_nO (где n изменяется от 1,5 до 3,9), препятствующие образованию сварного соединения.

3. Анализом фазового состава поверхностей разрушения сварных соединений выявлено наличие на поверхности изломов субоксидов Ti_3O или Ti_6O.

4. Полученные результаты экспериментальных исследований дают основание считать, что присутствующие в контакте свариваемых заготовок субоксидные пленки являются существенным барьером для реализации процесса сварки и образование сварного соединения происходит в процессе деформации контактных поверхностей, необходимой не только для образования физического контакта, но и для разрушения субоксидов и активации свариваемых поверхностей.

Результаты исследований получены на оборудовании Центрально-Черноземного коллективного центра анализа структуры, элементного и химического состава материалов (КЦ СЭХС) Воронежского государственного технического университета и центра коллективного пользования научным оборудованием (ЦКПНО) Воронежского государственного университета.

Литература

1. Диффузионная сварка титановых тонкостенных конструкций с тавровым соединением / В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин, А.С. Ларсов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 130 – 133.

2. Пешков В.В., Булков А.Б., Коломенский А.Б. Фрактография, металлография и свойства титановых сплавов и диффузионно-сварных соединений; под ред. В.Г. Егорова. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2017. 290 с.

3. Автовакуумирование в контактном зазоре при диффузионной сварке титана / В.В. Пешков, Г.П. Бесплохотный, Л.В. Усачева, В.Р. Петренко // Сварочное производство. 2004. № 11. С. 15 – 17.

4. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин, Д. Джой, Ч. Фиори, Э. Лифшин. М.: Мир, 1984. 303 с.

5. Количественный электронно-зондовый микроанализ / Т. Малви, В.Д. Скотт, С.Дж.Б. Рид, М.Дж.К. Кокс, Г. Лав. М.: «Мир», 1986. 352 с.

6. JCPDS – International Centre for Diffraction Data. – 1998.

7. Максимович Г.Г., Спектор Я.И. Влияние длительности высокотемпературного вакуумного отжига на структуру и свойства титановых сплавов // МиТОМ. 1982. № 7. С. 11 – 14.

Поступила 23.05.2018; принята к публикации 19.09.2018

Информация об авторах

Пешков Владимир Владимирович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: otsp@vorstu.ru

Булков Алексей Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bulkov_ab@mail.ru

Кущев Сергей Борисович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kushev_sb@mail.ru

Агапов Борис Львович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: b.agapov2010@yandex.ru
Донцов Алексей Игоревич – канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: dontalex@mail.ru
Канныкин Сергей Владимирович - канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: svkannykin@gmail.ru

TOPOGRAPHY, CHEMICAL AND PHASE COMPOSITION OF FRACTURE SURFACES OF DIFFUSION-WELDED COMPOUNDS

V.V. Peshkov[1], A.B. Bulkov[1], S.B. Kushchev[1], B.L. Agapov[2], A.I. Dontsov[2], S.V. Kannykin[2]

[1]Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
[2]Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract: experimental studies were carried out on tubular samples with the wall thickness δз = 0.5 mm from OT4 alloy (imitating one cell of a honeycomb of a laminated composite) to the end of which plates with the thickness δ0 from 0.5 to 2 mm from the sheet alloy OT4-1 (simulating the load-bearing layers of the composite) were welded. Diffusion welding was carried out at the temperature of 900 °C, the compressive pressure of 2.8 MPa in the vacuum of 2·10-2 Pa for a time of up to 60 minutes. The welded joints were tested for tearing, then the fracture surfaces were examined. The analysis of the topography of the fracture surfaces showed that when δ0 was less than 1.5 mm, the destruction of the joint occurred along the plane of contact between the welded surfaces and the formation of poorly developed seizure areas, and fractions of film inclusions were present on the fractograms. The results of X-ray spectral microanalysis, X-ray diffractometry, and Auger spectroscopy of the fracture surfaces revealed sufficiently high oxygen content in the surface layers and it can be suggested that the suboxide films presenting in the contact of the welded preforms were a sufficient barrier to the implementation of the welding process. It was established that the formation of the welded joint occured during deformation of the contact surfaces necessary for the destruction of suboxides and the activation of welded surfaces

Key words: diffusion welding, contact zone, deformation, seizure areas, fractography

References

1. Peshkov V.V., Bulkov A.B., Larsov A.S. “Diffusion welding of titanium thin-walled structures with a T-joint”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta),* 2018, vol. 14, no. 4, pp. 130-133.
2. Peshkov V.V., Bulkov A.B., Kolomensky A.B. “Fractography, metallography and properties of titanium alloys and diffusion-welded joints” (“Fraktografiya, metallografiya i svoystva titanovykh splavov i diffuzionno-svarnykh soedineniy”), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2017, 290 p.
3. Peshkov V.V., Besplokhotnyy G.P., Usacheva L.V., Petrenko V.R. “Auto-vacuuming in the contact gap during diffusion welding of titanium”, *Welding production (Svarochnoe proizvodstvo)*, 2011, no. 4, pp. 15-18.
4. Gouldstein J., Newbury D., Eclin P., Joy D., Fiori C., Lifshin E. “Raster electron microscopy and X-ray microanalysis” (“Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenovskiy mikroanaliz”), Moscow, Mir, 1984, 303 p.
5. Malvey T., Scott V.D., Reed S.J.B., Cox M.J.K., Love G. “Quantitative electron probe microanalysis” (“Kolichestvennyy elektronno-zondovyy mikroanaliz”), Moscow, Mir, 1986, 352 p.
6. JCPDS, International Centre for Diffraction Data, 1998.
7. Maksimovich G.G., Spector Ya.I. “Influence of the duration of high-temperature vacuum annealing on the structure and properties of titanium alloys”, *MiTOM*, 1982, no. 7, pp. 11-14.

Submitted 23.05.2018; revised 19.09.2018

Information about the authors

Vladimir V. Peshkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: otsp@vorstu.ru
Aleksey B. Bulkov, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: bulkov_ab@mail.ru
Sergey B. Kushchev, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: kushev_sb@mail.ru
Boris L. Agapov, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya square, Voronezh, 394018, Russia), e-mail: b.agapov2010@yandex.ru
Aleksey I. Dontsov, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya square, Voronezh, 394018, Russia), e-mail: dontalex@mail.ru
Sergey V. Kannykin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya square, Voronezh, 394018, Russia), e-mail: svkannykin@gmail.ru

УДК 620.179.111.2

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО НАБОРА ДЛЯ КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

И.О. Богачев, М.Н. Давыдов, Ю.С. Ткаченко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрен метод капиллярного контроля и проведено сравнение распространённых наборов для его проведения. Изложены преимущества капиллярного контроля по сравнению с другими методами неразрушающего контроля. Сформулированы основные задачи соответствия заявленного класса чувствительности и критерии оптимальности. Описаны применяемые наборы, вспомогательное оборудование и объект контроля. Реализован метод проверки классов чувствительности используемых пенетрантов на контрольном образце. Рассмотрены этапы проведения капиллярного контроля, выделены особенности и недостатки применяемых наборов. Показаны преимущества очистителя, проявителя и пенетранта одного производителя перед его конкурентом. По полученным результатам проведен анализ дефектов на контролируемом изделии. Рассмотрены дефекты следующих типов: «одиночные поры», «скопления пор», «цепочки пор», «рыхлоты» и «ложные индикации». Найдены размеры индикаций, их ориентированность на поверхности и сопоставлены получившиеся значения. Для каждого набора рассчитана ширина раскрытия этих дефектов. Проведена разбраковка в соответствии с нормативно-технической документацией. Практическим путем выделена зависимость расхода от контролируемой площади и составлена таблица для каждого компонента выбранных наборов. По полученным данным рассмотрен риск перебраковки изделия и причины отличия цен исследуемых наборов для капиллярного метода контроля

Ключевые слова: неразрушающий контроль, капиллярный контроль, класс чувствительности, шероховатость поверхности, HELLING, SHERWIN

Введение

Капиллярный контроль является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля (НК). Это связано с совокупностью его качеств: возможности выявления микроскопических дефектов на поверхности, недоступных другим методам НК, стоимости контроля, простоте, отсутствию сложного и многочисленного оборудования.

Сегодня на рынке существует около двух десятков фирм, поставляющих расходные материалы для капиллярного контроля. Подавляющее большинство таких наборов иностранного производства. Они аттестованы по Российским стандартам чувствительности, имеют единый экологический класс, но сильно различаются в ценовом диапазоне. Исходя из этого возникает несколько вопросов: соответствуют ли наборы заявленному классу чувствительности и как подобрать оптимальный?

К сожалению, теоретически невозможно показать преимущества одного набора перед другим. Поэтому сравнение будет производиться только на практической основе.

Целью данной статьи является сравнение двух распространенных наборов для капиллярной дефектоскопии, при одинаковых условиях на объекте. Обнаружение особенностей и различий в ходе проведения контроля.

Оборудование и объект контроля

Объектом контроля является рабочее колесо нефтяного насоса (рис. 1). Способ изготовления: литье по выплавляемым моделям. Марка материала – сталь 20ГЛ. Шероховатость поверхности равна Rz40.

Контроль будет производиться на произвольных участках, так как это не является определяющим фактором и не повлияет на последующие сравнения.

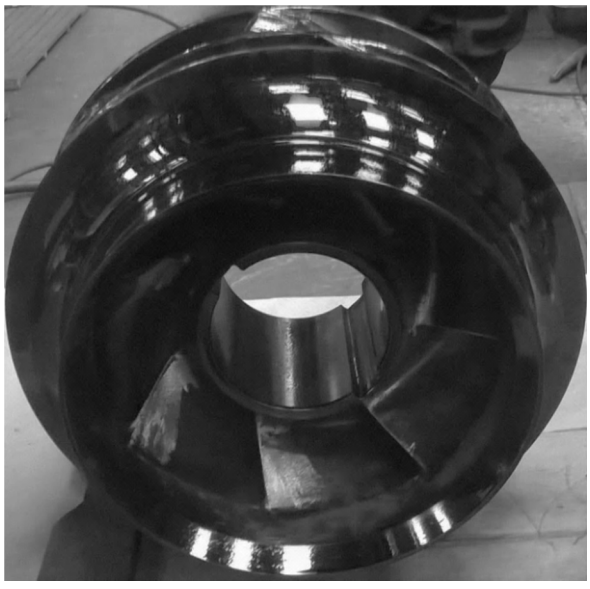


Рис. 1. Рабочее колесо нефтяного насоса (с нанесенным пенетрантом)

© Богачев И.О., Давыдов М.Н., Ткаченко Ю.С., 2018

Из всего многообразия представленных на рынке наборов для капиллярной дефектоскопии были выбраны Helling Nord Test (рис. 2) и Sherwin Dubl Chek (рис. 3) по II классу чувствительности. Состав обоих состоит из пенетранта, очистителя и проявителя в аэрозольных баллонах. Производятся фирмами «HELLING» гмбх, Германия и «Sherwin Babb Co», Франция [7,8]. Эти наборы имеют схожие характеристики и класс чувствительности, что соответствует необходимым условиям для детального сравнения и требованиям нормативно-технических документов на данное изделие.

Рис. 2. Набор для капиллярной дефектоскопии Helling Nord Test (пенетрант U88, очиститель U87 и проявитель U89)

Рис. 3. Набор для капиллярной дефектоскопии Sherwin Dubl Chek (пенетрант DP-55, очиститель DR-60 и проявитель D-100)

Информация о химическом составе наборов является собственностью производителя и не может быть разглашена.

Проведение сравнения

В самом начале следует указать на то, что контрольный образец для капиллярной дефектоскопии (рис. 4) не подходит для детального сравнения. Это связано со слабым раскрытием искусственных дефектов и невозможностью произвести глубокий анализ полученных результатов.

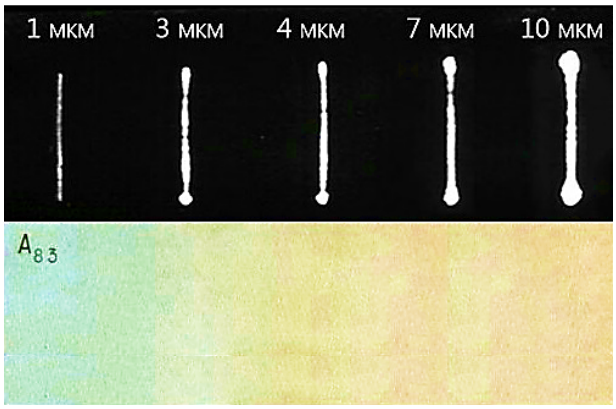


Рис. 4. Контрольный образец для капиллярной дефектоскопии по II классу чувствительности

Однако в результате проверки наборов на контрольном образце можно увидеть, что пенетрант Helling U88 имеет раскрытие дефектов в 1 мкм, а пенетрант Sherwin DP-55 раскрытие в 3 мкм.

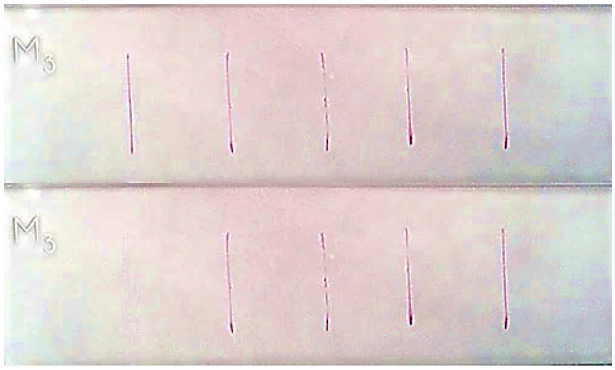


Рис. 5. Результаты проверки наборов на контрольном образце. (Helling Nord Test сверху, Sherwin Dubl Chek снизу)

Таблица 1

Классы чувствительности пенетрантов

Класс чувствительности	Ширина раскрытия дефекта, мкм
I	менее 1
II	от 1 до 10
III	от 10 до 100

В соответствии с ГОСТ 18442-80 (табл. 1) пенетрант Helling U88 при проверке находится близко к I классу, так как без проблем раскрывает дефект в 1 мкм [3].

Проведение капиллярного контроля делится на 4 этапа:

Этап 1. Предварительная очистка. Поверхность контроля необходимо предварительно очистить с помощью очистителя. Загрязняющие вещества и любые покрытия должны быть удалены. После этого поверхность контроля нужно высушить, для того чтобы в полости дефектов не осталось очистителя.

В ходе проведения этого этапа очиститель Helling U87 показал лучшие результаты по удалению загрязнений и быстрому высыханию. Это связано с его спиртовой основой в отличие Sherwin DR-60.

Этап 2. Нанесение пенетранта. Пенетрант наносится на поверхность путем распыления, чтобы контролируемый участок был полностью покрыт. Далее его следует выдержать необходимое время, не допуская высыхания.

Пенетрант Helling U88 имеет темно- вишневый оттенок, а Sherwin DP-55 светло- красный. В процессе нанесения распылители у пенетрантов имеют различия. Helling U88 имеет широкий и сильный факел, что позволяет покрывать контролируемую поверхность за один проход. У Sherwin DP-55 факел узкий и более слабый. Это приводит к частичному перекрытию нанесенных слоев при дополнительном подкрашивании, что, в свою очередь, влияет на расход.

Этап 3. Удаление избытка пенетранта. Избыток удаляется безворсовой ветошью, смоченной очистителем. Категорически запрещаются распыление очистителя на контролируемую поверхность и продувка сильной струей воздуха. Это связано с высокой вероятностью выбить пенетрант из полости дефектов.

При удалении пенетранта с поверхности детали лучше показал себя очиститель Sherwin DR-60. Благодаря своей структуре он плохо впитывается в ветошь, что позволяет эффективнее удалять избыток пенетранта. Очиститель Helling U87 наоборот обладает высокой проникающей способностью в волокна ветоши. В результате очистки это приводит к ее негодности и влияет на расход. При этом в ходе удаления пенетранта он втирается вместе с микроскопическим ворсом ветоши в поверхность детали и при проявлении создает розовый фон.

Этап 4. Нанесение проявителя. Проявитель наносится на контролируемую поверхность несколькими тонкими слоями без потеков и проблесков непокрытого металла. Для этого начинать нужно в стороне от контролируемого участка и равномерно распылять по поверхности. Запрещается наносить толстый слой, так как он будет маскировать дефекты и затруднять их идентификацию. После нанесения проявитель следует выдержать необходимое время, чтобы достичь максимальной визуализации индикаций дефектов.

Проявитель U89 имеет более жидкую структуру, в отличие от Sherwin D-100. Это сказывается при контроле деталей сферической формы. При нанесении последующего слоя образуются небольшие потеки. Проявитель Sherwin D-100 при начальном этапе высыхания обладает порошкообразной формой, что влияет на равномерное высыхание нескольких слоев.

При детальном сравнении температура в помещении равна 20-25 ^{o} С, время выдержки пенетранта на изделии 20 мин, время проявления 15мин [4].

Анализ полученных результатов

Самыми распространенными дефектами в рассматриваемом изделии являются одиночные поры, их скопления и цепочки, а также рыхлоты.

«Скоплением пор» называется дефект, состоящий из 3-х и более индикаций, отделенных встык, расстояние между которыми менее 2 мм. «Цепочкой пор» является дефект, состоящий более чем из 3-х индикаций, расположенных на одной линии, расстояние между которыми менее 2 мм [5]. Признаком дефекта является наличие индикаторного рисунка, максимальный размер которого превышает 2 мм [5]. «Рыхлота» — это дефект отливки в виде скопления мелких усадочных раковин [6].

При осмотре контрольной поверхности можно заметить различия индикаторных рисунков наборов Helling Nord Test и Sherwin Dubl Chek (рис. 6). В соответствии с нормативно-технической документацией, при контроле пенетрантом Sherwin DP-55 обнаружено 2 де-

фекта, а пенетраном Helling U88 6 дефектов. Эти дополнительные 4 дефекта имеют раскрытие в 3 мкм с размером 3-3.5 мм.

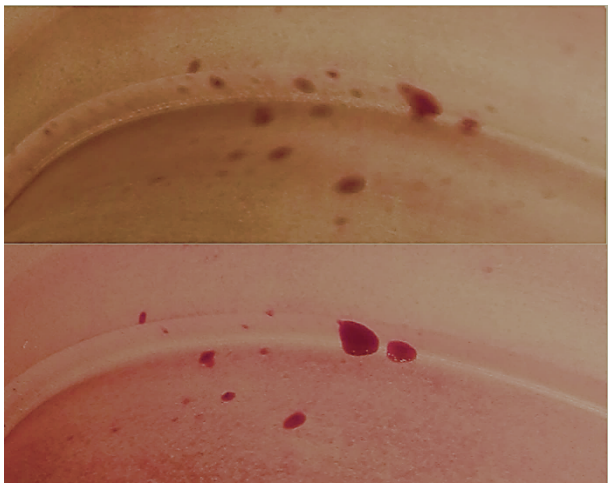


Рис. 6. Индикации дефектов типа «одиночные поры» (Helling Nord Test сверху, Sherwin Dubl Chek снизу)

При замерах дефектов с шириной раскрытия более 10 мкм результаты имеют минимальные различия, которые сводятся к частичному объединению индикаций (рис. 7, 8).

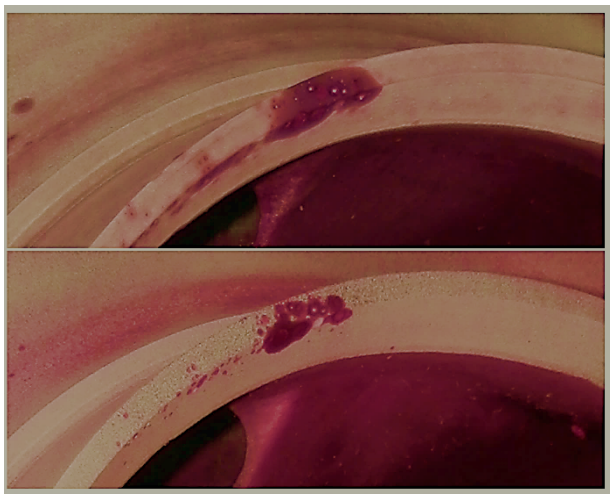


Рис. 7. Индикации дефекта типа «рыхлота» (Helling Nord Test сверху, Sherwin Dubl Chek снизу)

При капиллярном контроле возможно наличие «ложных индикаций». Основные причины их появления — это изменение микрорельефа поверхности, ее загрязнение или повреждение (риски, заусенцы, забоины) [4]. Благодаря большей ширине раскрытия дефектов пенетрант Helling U88 показал сильную индикацию от заусенцев на кромке поверхности (рис. 8). В свою очередь, у пенетранта Sherwin DP-55 выявлены только отдельные индикации. В процессе разбраковки эти различия могут привести к недостоверным результатам и стать поводом для повторного контроля данного участка.

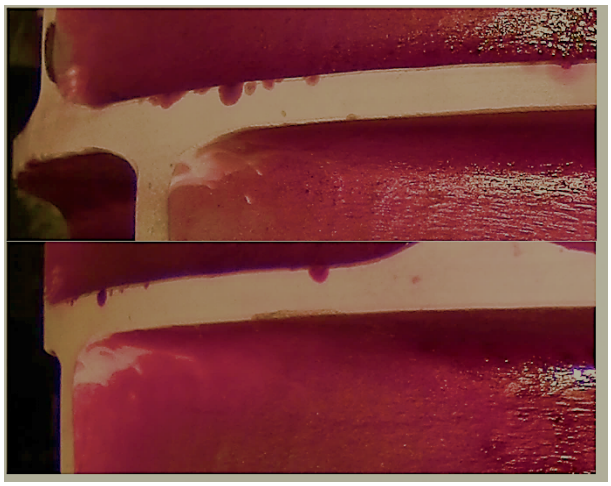


Рис. 8. Индикации ложных дефектов (Helling Nord Test сверху, Sherwin Dubl Chek снизу)

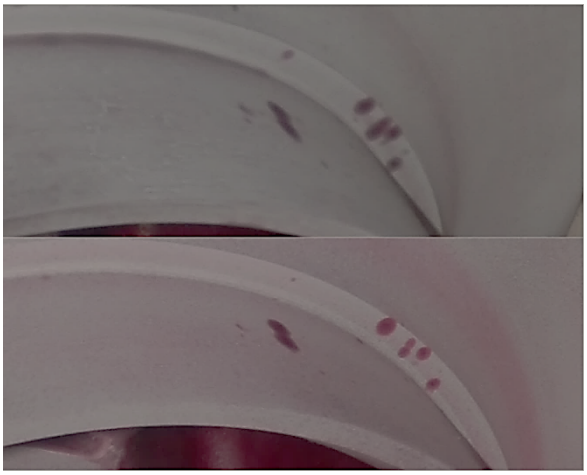


Рис. 9. Индикации дефекта типа «одиночные поры» и «скопление пор» (Helling Nord Test сверху, Sherwin Dubl Chek снизу)

Главный фактор, на который стоит обратить внимание — это то, что индикации дефектов, полученные в ходе контроля, существенно различаются у двух наборов. На рис. 10 это заметнее всего. Индикации дефектов с раскрываемостью от 3 до 5 мкм имеют различия в 1.5-2.5 мм.

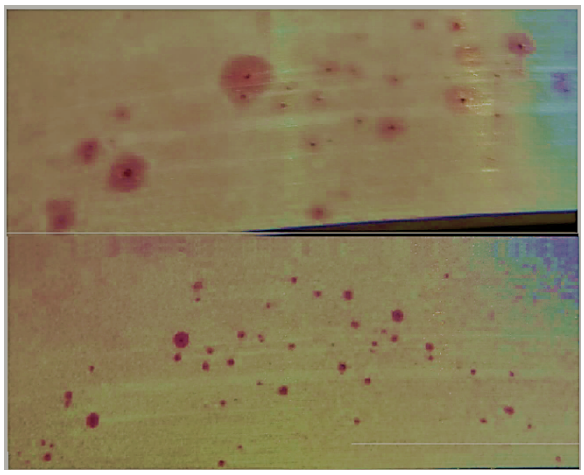


Рис. 10. Индикации дефекта типа «скопление пор» (Helling Nord Test сверху, Sherwin Dubl Chek снизу)

Нормы расхода на 1 кв. м у наборов Helling Nord Test и Sherwin Dubl Chek также различны. При длительном использовании практическим путем была выведена средняя зависимость расхода от площади контролируемого участка, с учетом сложной формы детали (табл. 2).

Таблица 2

Нормы расхода наборов для капиллярного контроля

Марка и тип баллона	Норма расхода мл/м2
Очиститель Helling U87	150
Очиститель Sherwin DR-60	130
Пенетрант Helling U88	90
Пенетрант Sherwin DP-55	120
Проявитель Helling U89	300
Проявитель Sherwin D-100	260

Выводы

В ходе проведения сравнения наборов для капиллярной дефектоскопии Helling Nord Test и Sherwin Dubl Chek были определены особенности проведения контроля и идентификации дефектов на данном изделии. Выделены существующие недостатки, параметры чувствительности при раскрытии дефектов различных размеров и схемы их расположения.

При анализе полученных результатов можно с уверенностью сказать, что оба набора соответствуют заявленному классу чувствительности. Но при сравнении результатов на контрольном образце и данной детали у пенетранта Helling U88 наблюдается высокая степень перебраковки, так как набор Helling Nord Test располагается на границе I и II класса чувствительности. Это связано с более жесткими европейскими нормами, под которые изготавливается импортная продукция.

Отличие в цене обуславливается качеством изготовления аэрозольных баллонов. Бракованные распылители и недостаточное давление приводит к его негодности или повышенному расходу ближе к концу емкости.

В заключении следует сказать, что оптимальным является набор Sherwin Dubl Chek, который качественно и надежно решает задачи в соответствии с нормативно-технической документацией на литые изделия.

Литература

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. 2-е изд., перераб, и доп. М.: Машиностроение, 2003.

2. Прохоренко П.П., Мигун Н.П., Стойчева И.В. Капиллярный неразрушающий контроль. Контроль проникающими веществами. Минск: Издательство Минского Института прикладной физики, 1998.

3. ГОСТ 18442-80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования, 1986.

4. РД 13-06-2006 Методические рекомендации о порядке проведения капиллярного контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах, 2006.

5. РД 23.080.00-КТН-051-13. Контроль качества литых деталей магистральных и подпорных насосов, 2013

6. ГОСТ 19200-80 Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов, 1989.

7. Каталог оборудования «HELLING» гмбх. Германия, 2017.

8. Каталог оборудования «Sherwin Babb Co». Франция, 2015.

Поступила 12.07.2018; принята к публикации 11.09.2018

Информация об авторах

Богачев Иван Олегович – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: thomas_munz@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8086-9448

Давыдов Максим Николаевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: mounta1n@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0586-5244

Ткаченко Юрий Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kafedra-ao@mail.ru

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF KITS FOR CAPILLARY DEFECTOSCOPY

I.O. Bogachev, M.N. Davydov, Yu.S. Tkachenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in this article, the method of capillary control is considered and a comparison of a pair of common kits for its implementation is made. The advantages of capillary control are compared with other methods of nondestructive testing. The main problems of the correspondence of the claimed sensitivity class and the optimality criteria are formulated. The applied kits, auxiliary equipment and object of control are described. A method for testing the sensitivity classes of the penetrants used on the control sample was carried out. The stages of conducting the capillary control are considered, the features and disadvantages of the applied sets are highlighted. The advantages of a cleaner, developer and penetrant of one manufacturer before its competitor are shown. Based on the results obtained, an analysis of defects on the controlled product was carried out. Type defects are considered: "single pores", "pore accumulations", "pores of chains", "friable" and "false indications". The sizes of indications, their orientation on the surface are found and the resulting values are compared. For each set, the width of the exposure of these defects is calculated. The inspection was carried out in accordance with the normative and technical documentation. Practically, the dependence of consumption on the monitored area was singled out and a table was compiled for each component of the selected sets. According to the data received, the risk of the product being crocheted and the reasons for the difference in the prices of the test kits for the capillary control method are considered

Key words: non-destructive testing, capillary control, sensitivity class, surface roughness, HELLING, SHERWIN

References

1. Klyuev V.V. “Non-destructive testing and diagnostics. Reference book” (“Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika. Spravochnik.”), Moscow, Mashinostroenie, 2003.
2. Prokhorenko P.P., Migun N.P., Stoycheva I.V. “Capillary nondestructive testing. Control using penetrating substances” (“Kapillyarnyy nerazrushayushchiy kontrol'. Kontrol' pronikayushchimi veshchestvami.”), Minsk Institute of Applied Physics, 1998.
3. GOST 18442-80 “Non-destructive testing. Capillary methods. General requirements” (“Kontrol' nerazrushayushchiy. Kapillyarnye metody. Obshchie trebovaniya.”), 1986.
4. RD 13-06-2006 “Guidelines on the order of conducting capillary control of technical devices and structures applied and operated on dangerous industrial objects” (“Metodicheskie rekomendatsii o poryadke provedeniya kapillyarnogo kontrolya tekhnicheskikh ustroystv i sooruzheniy, primenyayemykh i ekspluatiruyemykh na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh”), 2006.
5. RD 23.080.00-KTN-051-13 “Quality control of cast parts of main and retaining pumps” (“Kontrol' kachestva litykh detaley magistral'nykh i podpornykh nasosov”), 2013
6. GOST 19200-80 “Castings of cast iron and steel. Terms and definitions of defects” (“Otlivki iz chuguna i stali. Terminy i opredeleniya defektov”), 1989.
7. Catalog of equipment (“Katalog oborudovaniya”) "HELLING" GmbH, Germany, 2017.
8. Catalog of equipment (“Katalog oborudovaniya”) "Sherwin Babb Co", France, 2015.

Submitted 12.07.2018; revised 11.09.2018

Information about the authors

Ivan O. Bogachev, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: thomas_munz@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8086-9448
Maksim N. Davydov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: mounta1n@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0586-5244
Yuriy S. Tkachenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kafedra-ao@mail.ru

УДК 62-213.6

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБШИВОК САМОЛЕТА

М.В. Молод[1], В.И. Максименков[1], В.И. Федосеев[2]

[1]Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия
[2]Филиал ПАО «Корпорация «Иркут», г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрен метод повышения равномерности деформации в продольном и поперечном направлениях деформируемой заготовки. Сформулированы цель и задачи исследования. Проведен анализ процесса формообразования обшивок на оборудовании с ЧПУ. Показан характер напряжений и деформаций при их минимальном значении по поперечным сечениям заготовки. Выявлена неравномерность деформаций и напряжений при формообразовании обшивок двойной кривизны. Разработан метод выравнивания деформации за счет получения на технологическом припуске пуансона вогнутой поверхности, полученной расчетным методом. Получена зависимость, позволяющая проектировать вогнутую поверхность с учетом геометрических параметров пуансона. Приведена методика проектирования пуансона. Выполнен пример расчета геометрических параметров пуансона. Проведены экспериментальные исследования на оборудовании с ЧПУ, подтверждающие эффективность разработанного метода выравнивания деформаций в продольном и поперечном направлениях, обеспечивающие повышение качества получаемых обшивок

Ключевые слова: пуансон, технологическая поверхность, вогнутая поверхность, формообразование, деформации, контрформовка, выравнивание, припуск

Введение

При проектировании деталей самолета необходимо обеспечить создание равнопрочных конструкций, исключая концентраторы напряжений.

Особый интерес представляют обшивки самолета, выходящие на аэродинамические поверхности.

При изготовлении обшивок на обтяжных прессах за счет неравномерности деформаций возникает разнотолщинность материала, вызывая концентраторы напряжений, приводящие к возможному появлению браковочных признаков. На решение задач по выравниванию деформаций обшивок направлена данная статья.

Постановка задачи

Выполнен анализ процесса формообразования обшивок методом обтяжки [1].

По данной проблеме проведен комплекс исследований [2, 3].

Результаты исследований обеспечили выравнивание деформаций по длине обшивки, при этом максимальный эффект достигается за счет применения смазки.

В работе поставлена задача, позволяющая обеспечить выравнивание деформаций по длине и ширине заготовки.

Исследование процесса формообразования

В процессе исследования процесса обтяжки решалась задача по выравниванию деформаций на поверхности заготовки, а следовательно, и их толщин.

Рассмотрим процесс поперечной обтяжки [1].

Плоская заготовка 1 (рис. 1) фиксируется в зажимах 6 и при перемещении пуансона 2, установленного на стол пресса 3 с помощью штока 4, гидроцилиндра 5, занимает верхнее положение, принимая форму пуансона. Процесс обтяжки заканчивается тогда, когда заготовка полностью повторит рабочую поверхность пуансона, при этом: напряжения на боковых кромках соответствуют напряжению текучести, то есть $\sigma_{min}= \sigma_т$; величина минимальных деформаций $\varepsilon_{min}\geq 1\%$.

Таким образом, как показано на рис. 1, при формообразовании обшивки двойной кривизны создается неравномерность напряжений и деформаций.

© Молод М.В., Максименков В.И., Федосеев В.И., 2018

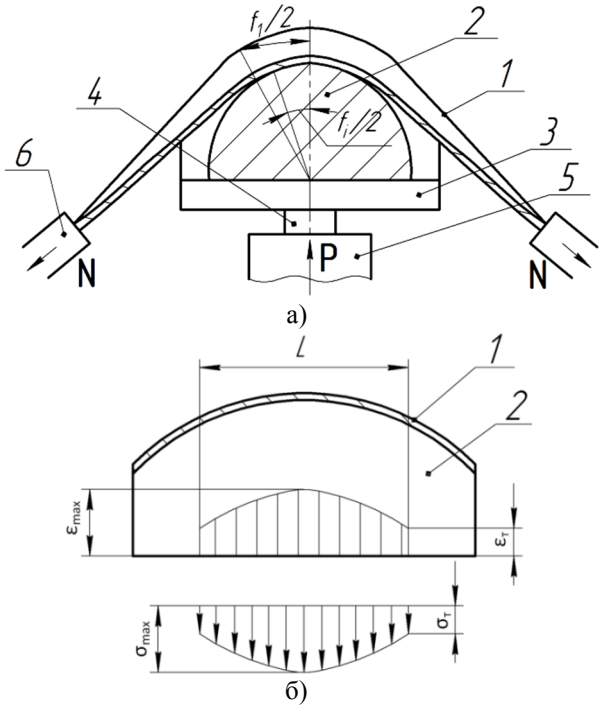


Рис. 1
1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – стол пресса; 4 – шток гидроцилиндра; 5 – гидроцилиндр; 6 - зажимы

Рассмотрим конструкцию обтяжного пуансона (рис. 2): обтяжной пуансон 1 содержит рабочую поверхность, сопряженную с технологической поверхностью 2, выполненную вогнутой; при этом длину S_i вогнутой технологической поверхности в каждом i-м поперечном сечении пуансона определяют по зависимости:

$$S_i = R_1(f_1 - f_i) + h\frac{4L_i^2}{B^2}f_i \,, \qquad (1)$$

где R_i – радиус максимального сечения пуансона;

f_1 – угол охвата максимального сечения пуансона;

f_i – угол охвата сечения пуансона в i-м сечении;

h - стрела прогиба максимального сечения пуансона;

L_i - расстояние от оси пуансона до i-ого сечения пуансона;

B - длина пуансона.

Длина сечений вогнутой технологической поверхности пуансона в направлении обтяжки задается в зависимости от длины сечения его рабочей поверхности, её расположения, а также от длины заготовки в этих сечениях, увеличенными по сравнению с недеформированным состоянием на одну и ту же степень деформации в зависимости от требуемой точности прилегания.

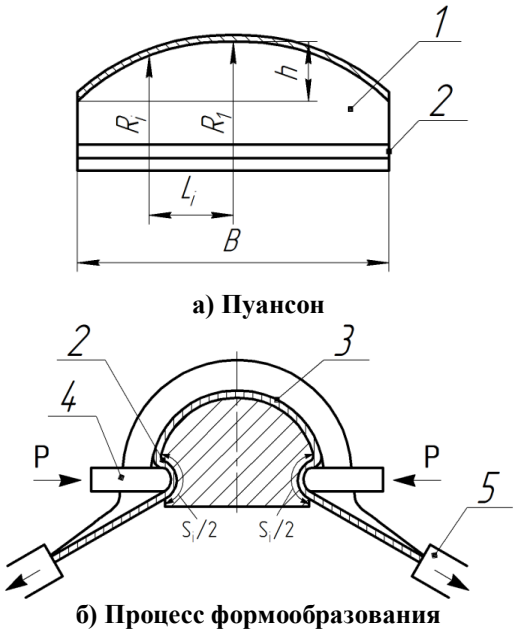


Рис. 2
1 – пуансон; 2 – вогнутая технологическая поверхность; 3 – заготовка; 4 – контрформовка; 5 – зажимы

Выполнение технологической поверхности 2 с длиной дуги в поперечных сечениях по длине пуансона, определяемой по зависимости (1), обеспечивает равномерное растяжение заготовки за счет выравнивания длин деформированных участков. Выполнение технологической поверхности 2 вогнутой формы позволяет выполнить пуансон компактным, а также обеспечивает простоту конструктивного выполнения контрформовок при их размещении на обтяжном прессе.

Окончание процесса формообразования осуществляется перемещением контрформовок 4, обеспечивающих прилегание заготовки 3 в зоне вогнутой поверхности.

Методика проектирования обтяжного пуансона

Согласно зависимости (1) приведены расчеты параметров пуансона для формообразования заготовки прямоугольной формы С=1900 мм из алюминиевого сплава толщиной 1,2 мм.

Методика проектирования обтяжного пуансона:

1. Принимают необходимую степень деформаций для фиксирования формы детали во всех сечениях ε=0,02.

Длина заготовки после деформации определяется: $Ск = Ci(1 + \varepsilon) = 1938$ мм.

2. Длину сечений вогнутой технологической поверхности пуансона определяют по зависимости (1), зная формы и размеры рабочей поверхности.

В таблице представлена зависимость длины сечения вогнутой технологической поверхности от L_i, f_i, R_1, B и h.

С учетом марки материала заготовки, ее толщины, прочности пуансона выбираем значение радиусов вогнутой технологической поверхности и проектируем обтяжной пуансон.

Геометрические размеры пуансона приведены в таблице.

Длина деформируемой заготовки, мм $C_к$	Радиус максимального сечения, мм R	Углы охвата максимального сечения и i-ого сечения, град f_i		Стрела прогиба, мм h	Длина пуансона, мм B	Расстояние от середины пуансона до рассматриваемого сечения, мм L_i	Длина сечения технологической поверхности, мм S
1938	500	150	140	100	1000	100	97
			130			200	210
			120			300	337
			110			400	472

Экспериментальные исследования

Процесс формообразования обшивок осуществляется на прессе FEKD. На поверхность заготовки для определения поля деформаций наносилась делительная сетка размером 100×100 мм.

Характер деформаций имеет вид, представленный на рис. 3, что указывает на эффективность метода выравнивания деформаций, который может использоваться при изготовлении обшивок на обтяжных прессах, обеспечивая повышение качества получаемых деталей. Это особенно важно при изготовлении перфорированных обшивок, имеющих ограниченные пластические характеристики.

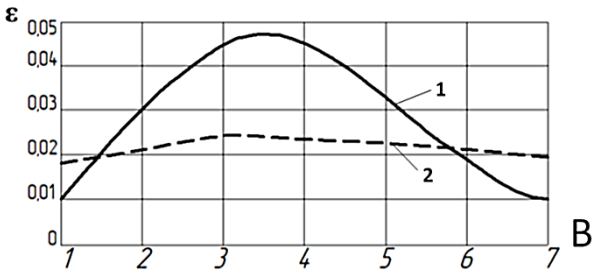


Рис. 3. Характер распределения деформаций по длине пуансона:
1 – традиционный метод при обтяжке;
2 – предложенный метод

Выводы

1. Проведен анализ процесса формообразования обшивок на обтяжном прессе, который выявил неравномерность деформаций, приводящих к концентрации напряжений на поверхности заготовки, оказывающих негативное влияние на ресурс деталей.

2. Разработана методика проектирования пуансона, позволяющая выполнить расчеты геометрических размеров вогнутой технологической поверхности с обеспечением выравнивания деформаций заготовки при обтяжке.

3. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие теоретическое обоснование предложенного метода выравнивания деформаций получаемых обшивок в продольном и поперечном направлениях, обеспечивая повышение качества деталей самолета.

Литература

1. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 351 с.

2. Молод М.В. Разработка универсального пуансона // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 1. С. 55-57.

3. Максименков В.И., Одинг С.С., Молод М.В. Определение параметров трения при формообразовании оболочек: монография. Воронеж: ВГТУ, 2015. 80 с.

Поступила 06.08.2018; принята к публикации 14.09.2018

Информация об авторах

Молод Марина Владиславовна - д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры «Самолетостроение», Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: molodmv@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2875-5643

Максименков Владимир Иванович - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Самолетостроение», Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0470-071X

Федосеев Владислав Игоревич - инженер-конструктор, отдел прочности, Филиал публичного акционерного общества «Корпорация «Иркут» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, д. 27), e-mail: vladislav.f@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3974-6531

THE WAY TO INCREASE QUALITY OF AN AIRCRAFT SKIN

M.V. Molod[1], V.I. Maksimenkov[1], V.I. Fedoseev[2]

[1]Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
[2]Public company «Corporation «Irkut», Voronezh, Russia

Abstract: the method of increasing the uniformity of deformation in the longitudinal and transverse directions of the deformable workpiece is considered. The purpose and objectives of the study are formulated. The analysis of the process of shaping the skins on the equipment with CNC is done. The character of stresses and strains at their minimum value along the cross-sections of the workpiece is shown. The non-uniformity of deformations and stresses in the formation of double curvature casings was revealed. A method was developed for leveling the deformation by obtaining a concave surface obtained by a computational method on a technological allowance of a punch. The dependence is obtained, which allows one to design a concave surface taking into account the geometrical parameters of the punch. The technique of punch design is given. An example of calculating the geometric parameters of the punch is made. Experimental studies on CNC equipment were carried out, confirming the effectiveness of the developed method of straightening deformations in the longitudinal and transverse directions, ensuring an improvement in the quality of the obtained skin

Key words: punch, technological surface, concave surface, shaping, deformations, counter forming, deformations alignment, allowance

References

1. Gorbunov M.N. “Technology of blanking and stamping works in the aviation manufacture” (“Tekhnologiya zagotovitelno-shtampovochnykh rabot v proizvodstve letatelnykh apparatov”), Moscow, Mashinostroenie, 1970, 351 p.

2. Molod M.V. “Development of universal punch”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 12, no. 1, pp. 55-57.

3. Maksimenkov V.I., Oding S.S., Molod M.V. “Determination of the friction parameters for shell shaping. Monograph” (“Opredelenie parametrov treniya pri formoobrazovanii obolochek. Monografiya”), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2015, 80 p.

Submitted 06.08.2018; revised 14.09.2018

Information about the authors

Vladimir I. Maksimenkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0470-071X
Marina V. Molod, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: molodmv@yandex.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2875-5643
Vladislav I. Fedoseev, Engineering Designer, Public company «Corporation «Irkut» (27 Tsiolkovskogo st., Voronezh 394029, Russia), e-mail: vladislav.f@inbox.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3974-6531

УДК 621.793.74

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА НА ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

С.Ю. Жачкин[1], М.Н. Краснова[1], Г.И. Трифонов[1,2], Н.А. Пеньков[2]

[1] Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия
[2] Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

Аннотация: из литературных источников известно, что наиболее используемыми методиками по восстановлению деталей машин и механизмов являются технологии с применением высококонцентрированных потоков энергии, например, газотермическая обработка поверхностей. В области газотермической обработки поверхностей деталей активно используются системы уравнений для оценки физических, механических и химических особенностей (параметров) покрытия на поверхности деталей. В связи с этим вопросы разработки усовершенствованных систем уравнений по оценке и прогнозированию ключевых параметров процесса плазменного напыления стоят на первом месте при моделировании процесса газотермической технологии. В данной работе рассмотрено влияние кинематических режимов на формирование плазменного покрытия на сложнопрофильной поверхности детали. В частности, проанализирована кинематика нанесения износостойкого покрытия на винтовую поверхность детали, а также рассмотрено влияние скорости нанесения покрытия на толщину напыляемого слоя и температуру нагрева детали. Составлены усовершенствованные расчетные уравнения по прогнозированию толщины напыляемого слоя и нагрева винтовой (сложнопрофильной) поверхности. Разработанные математические зависимости в перспективе планируется использовать при разработке технологических карт и последующих корреляциях технологии нанесения плазменного напыления на автоматизированных и роботизированных комплексах при обработке деталей со сложной геометрической образующей

Ключевые слова: плазменное напыление, скорость, толщина покрытия, температура поверхности, моделирование, кинематика

Введение

В настоящее время плазменное напыление является одним из самых качественных, дешевых и эффективных методов нанесения защитных покрытий на поверхность детали с целью повышения её эксплуатационных характеристик. При этом с помощью потоков газотермической плазмы можно напылять любые композитные порошковые материалы.

При контакте высококонцентрированного потока энергии в виде плазменной струи с поверхностью восстанавливаемой детали протекают всевозможные физико-химические процессы. Параметры, характеризующие процесс их протекания, и качество получаемого плазменного покрытия определяются температурой, скоростью и временем нагрева поверхности детали, равномерностью распределения напыляемого слоя, свойствами обрабатываемого материала и т.д.

Необходимо учесть, что образование (нанесение) множества слоев с контролируемой геометрией формообразования возможно при условии точного математического анализа и проектирования на основе кинематики относительного перемещения обрабатываемой детали и инструмента (плазматрона).

Из чего следует, что в областях методологии и методологического планирования при использовании газотермических технологий, в частности плазменного напыления, можно вынести конкретные проблемные вопросы, относящиеся к конкретной детали и её функциональному слою [1].

Данная работа посвящена актуальной проблеме влияния кинематических режимов на формирование плазменного покрытия, а также разработке и усовершенствованию расчетных методов по прогнозированию толщины напыляемого слоя и нагрева винтовой (сложнопрофильной) поверхности обрабатываемой детали.

Постановка задачи

Одним из основных этапов разработки технологического процесса является получение равнотолщинного слоя покрытия при напылении. Решение поставленной задачи можно реализовать посредством управления параметрами процесса, для оптимизации которых необходимо определить зависимости кинематических режимов процесса.

© Жачкин С.Ю., Краснова М.Н., Трифонов Г.И., Пеньков Н.А., 2018

При составлении математической расчетной модели по созданию плазменного слоя напыленного покрытия было принято решение об условном допущении:

- напыляемые частицы композитного порошкового материала имеют одинаковый диаметр;

- диаметр напыляемых частиц меньше диаметра создаваемого плазменного потока.

Поток частиц при заданном уровне неравномерности в основном проходит мимо детали. Следовательно, технология напыления *неподвижным* инструментом, а в нашем случае плазмотроном, применяется для получения высококачественных покрытий на экспериментальных образцах [2]. В основном, напыление покрытий производится с постоянной производительностью плазматрона, который перемещается со скоростью *v*.

Высота напыленного покрытия при этом в направлении движения остается постоянной, а поперечная толщина находится по формуле [3]:

$$H_{\max} = \frac{\delta \times \sqrt{\pi \rho_1}}{v} \times \left\{ \begin{array}{l} \exp(-\frac{x^2}{\rho_1^2}) + \\ + \exp\left[-\frac{1}{\rho_1^2}(x-A)^2\right] + \\ + \exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1^2}\right] \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где H_{max} – высота напыленного покрытия (*мм*); x – координата движения инструмента (плазмотрона) относительно плоскости напыления детали (*мм*); ρ_1 – радиус пятна распыления (*мм*), δ – коэффициент, характеризующий скорость увеличения толщины покрытия в центре пятна распыла ($\sqrt{мм^3}/с$); A – шаг смещения (*мм*).

В результате линейного перемещения плазмотрона относительно сложнопрофильной поверхности детали напыляемый композитный материал осаждается в виде полувалика. Для получения покрытий на больших поверхностях напыление производят в два или несколько рядов. При этом смещение оси плазменного потока устанавливается так, чтобы при напылении произошло взаимное наложение и частичное перекрытие соседних полуваликов.

Также одним из основных этапов разработки технологического процесса плазменного напыления является анализ уравнения теплопроводности, влияния кинематических режимов плазменной обработки на сложнопрофильную геометрическую составляющую зоны оплавления, а главное решение уравнения нагрева поверхности детали.

Для прогноза высококонцентрированных потоков энергии на поверхности детали используется модель лучистого и конвективного теплообмена, основанная на теории пограничного слоя [4].

Опираясь на работы [4 – 5], запишем систему уравнений, которая в обобщенной форме описывает нагрев поверхности материала детали плазменной дугой:

$$\begin{array}{l} q = q_K + q_Л + q_e \\ q_K = a_1\left(T_{плаз} - T_{пов}\right), \\ q_л = \xi_1 \xi_2 \times \sigma_c T_П^4 \end{array} \quad (2)$$

где q – нагрев материала поверхности детали плазменной дугой (*Дж*); q_K – конвективный теплообмен (*Дж*); $q_Л$ – лучистый теплообмен (*Дж*); q_e – нагрев от электрического тока (*Дж*); a_1 – коэффициент температуропроводности ($м^2/с$); $T_{плаз}$ – температура плазменной дуги на внешней границе пограничного слоя (*К*); $T_{пов}$ – температура поверхности (*К*); ξ_1 – интегральная поглощательная способность поверхности; ξ_2 – степень черноты плазмы; σ_c – постоянная Стефана-Больцмана; $T_П$ - температура плазмы (*К*).

Поскольку в системе уравнений (2) все величины экспериментально определимы, и установить их значение можно с помощью лабораторных испытаний и справочных данных, то переходим к величине, которая нуждается в более подробном математическом анализе, а именно к температуре нагрева напыляемой детали.

Уравнение процесса распространения тепла в обрабатываемой детали от мощного быстродвижущегося газотермического плазменного потока частиц, имеет вид [6]:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi\lambda v} \times \frac{\exp\left(\frac{z}{4a_1 t}\right)}{\sqrt{t(t_0 + t)}}, \quad (3)$$

где T – температура нагрева поверхности детали (*К*); y, z – ширина и глубина области нагрева (*мкм*); t – время (*сек.*); t_0 – длительность распространения фиктивного источника (*сек.*); T_0 - температура тела (*К*); Q – эффективная мощность плазменной дуги (*Вт*); υ – скорость пе-

ремещения источника теплоты (плазмотрона) (*м/с*).

Проанализировав формулы (1, 3), а также учитывая кинематические режимы и параметры плазменного напыления, их влияние на процесс формирования равнотолщинного покрытия, можно сделать вывод, что для разработки усовершенствованных математических зависимостей, позволяющих спрогнозировать значение толщины плазменного покрытия и температуры нагрева детали, требуется смоделировать:

1. Условия, обеспечивающие заданную толщину и шаг волнистости покрытия в виде системы уравнений.

2. Уравнения, которые в полной мере описывали бы кинематику движения плазмотрона *v*.

Методы исследования

При газотермической обработке, а в частности при использовании технологии плазменного напыления, одним из важных факторов является степень точности назначения кинематики движения узлов плазменной установки, а именно скоростей перемещения инструмента (плазмотрона) относительно обрабатываемой поверхности. Это связано с тем, что время нанесения единицы площади поверхности и толщина получаемого плазменного покрытия напрямую зависят от кинематики движения распылителя.

В работе [7] составлены и реализованы условия по обеспечению прогнозируемой толщины и шага волнистости наносимого покрытия:

$$\begin{gathered} v = \sqrt{(\frac{d\rho}{dt})^2 + \rho^2(\frac{d\varphi}{dt})^2 + (\frac{dz}{dt})^2} \\ z = \frac{\varphi\beta}{\sqrt{1 + (\sin\varphi\frac{d\rho}{dz} + \rho\cos\varphi\frac{d\varphi}{dz})^2}} \\ \rho = \rho(\varphi, z) \end{gathered}, \quad (4)$$

где ρ, φ, z – цилиндрические координаты, β – шаг спирали траектории перемещения центра пятна напыления по поверхности.

Первое уравнение системы (4) рассчитывает скорость перемещения инструмента (плазмотрона), второе – перемещение центра пятна напыления по обрабатываемой поверхности, третье – уравнение формообразования поверхности, подвергаемой плазменному напылению.

Основываясь на работах А.Ф. Пузрякова [7] и А.Ф. Ильющенко [8], была составлена таблица определения скорости перемещения плазмотрона для типичных поверхностей тел вращения.

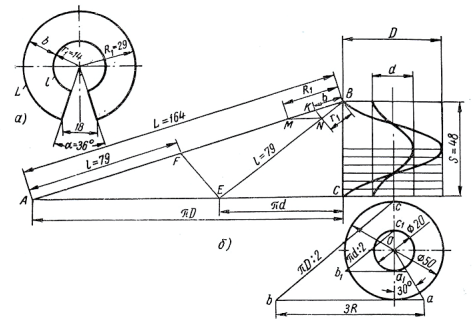
Определение скорости перемещения плазмотрона

№ п/п	Типовая поверхность	Уравнение скорости перемещения плазматрона
1	Дисковая	$v = \sqrt{(\frac{d\rho}{dt})^2 + \rho^2(\frac{d\varphi}{dt})^2}$
2	Коническая	$v = \sqrt{(\frac{d\rho}{dt})^2 + \rho^2(\frac{d\varphi}{dt})^2 + (\frac{dz}{dt})^2}$
3	Цилиндрическая	$v = \sqrt{\rho^2(\frac{d\varphi}{dt})^2 + (\frac{dz}{dt})^2}$
4	***Винтовая***	$v = \sqrt{\rho^2(\frac{d\varphi}{dt})^2 + (\frac{dz}{dt})^2}$

Описание кинематики плазменного напыления для типичных поверхностей: $\frac{d\varphi}{dt}$ – скорость вращения обрабатываемой детали, $\frac{dz}{dt}$ – продольная скорость перемещения инструмента, $\frac{d\rho}{dt}$ – радиальная скорость перемещения инструмента.

Как видно из приведенной таблицы, уравнения скорости перемещения плазмотрона для цилиндрической и винтовой поверхностей в общем случае одинаковы. Но, как известно, для цилиндрической поверхности уравнение образующей имеет вид $\rho = R = const$, а для винтовой поверхности значение ρ требует более детального математического анализа в виду сложности нанесения защитного плазменного слоя, а также по причине условий эксплуатации данного типа детали.

Опираясь на описание и технологию изготовления деталей с винтовой поверхностью, а также на геометрию развертки винтовой линии, представленной на рисунке, выведем необходимые выражения для описания поверхности напыления.



Развертка витка винтовой линии (геликоида)

Так как винтовые линии развертываются в концентрические дуги при одинаковом центральном угле, то, следовательно, [9]:

$$\begin{gathered}\frac{r_1}{R_1}=\frac{c}{C}\\ r_1=\frac{ac}{C-c}\\ R_1=r_1+a\end{gathered}, \qquad (5)$$

где r_1 и R_1 – радиусы дуг (*мм*), c – длина витка внутренней винтовой линии (*мм*), C – длина витка внешней винтовой линии (*мм*), a – ширина винтовой поверхности (*мм*).

Учитывая уравнение угла выреза $\alpha=\frac{C-c}{R_1-r_1}$ [9], ширину винтовой поверхности a и крутизну подъема φ_1 [10], выводим уравнение напыления винтовой поверхности детали:

$$\begin{gathered}q=a-\Delta=\frac{C-C_1}{\alpha}=\\ =\frac{\pi\left(\sqrt{D^2\left(1+tg\varphi_1\right)-D_1{}^2\left(1+tg\varphi_1\right)}\right)}{\alpha},\end{gathered} \qquad (6)$$

где Δ – значение ширины винтовой поверхности, не подвергающееся напылению (*мм*), C_1 – длина витка внешней винтовой линии, не подвергаемая плазменному напылению (*мм*), D – внешний диаметр винтовой линии (*мм*), D_1 – диаметр винтовой линии, не подвергаемый плазменному напылению (*мм*).

Осуществим преобразования [7]:

$$\frac{d\varphi}{dt}=\frac{d\varphi}{dz}\times\frac{dz}{dt}=\frac{1}{\beta}\times\frac{dz}{dt} \qquad (7)$$

Совместив уравнение системы (4), которое описывает цилиндрическую координату z, и разработанное уравнение напыления винтовой поверхности детали (6), получаем:

$$\frac{d\varphi}{dt}=\frac{\sqrt{1+(a-\Delta)^2}}{\beta}\frac{dz}{dt}. \qquad (8)$$

Учитывая составленное уравнение (8), моделируем уточненное уравнение кинематики инструмента (плазмотрона) для винтовой поверхности детали [11]:

$$v=\sqrt{\frac{(a-\Delta)^2+(a-\Delta)^4}{\beta^2}+1}\times\frac{dz}{dt} \qquad (9)$$

В итоге корректируя уравнение движения плазмотрона v (4) относительно продольной скорости перемещения инструмента, получаем:

$$\frac{dz}{dt}=\frac{\beta v}{\sqrt{(a-\Delta)^4+(a-\Delta)^2+\beta^2}} \qquad (10)$$

Результаты

В итоге, используя полученные уравнения (9, 10), которые в полной мере описывают скорость перемещения плазматрона при напылении винтовой поверхности детали, при этом учитывая полученное уравнение напыления винтовой поверхности детали (6) и беря за основу уравнения (1, 3), получаем усовершенствованные уравнения для расчета прогнозируемой толщины плазменного покрытия и температуры нагрева детали:

$$\begin{gathered}H_{\max}=\frac{\delta\times\sqrt{\pi\rho_1}}{\sqrt{\frac{(a-\Delta)^2+(a-\Delta)^4}{\beta^2}+1}\times\frac{dz}{dt}}\times\\ \times\left\{\begin{array}{l}\exp\left(-\frac{x^2}{\rho_1{}^2}\right)+\\ +\exp\left[-\frac{1}{\rho_1{}^2}(x-A)^2\right]+\\ +\exp\left[-\frac{(x+A)^2}{\rho_1{}^2}\right]\end{array}\right\}\end{gathered} \qquad (11)$$

$$T = T_0 + \frac{Q}{2\pi\lambda\sqrt{\frac{(a-\Delta)^2+(a-\Delta)^4}{\beta^2}+1}\times\frac{dz}{dt}}\times \frac{\exp\left(\frac{z}{4a_1 t}\right)}{\sqrt{t(t_0+t)}} \quad . (12)$$

Разработанные математические зависимости в перспективе можно использовать при планировании и корреляции технологии нанесения плазменного напыления на автоматизированных и роботизированных комплексах при обработке деталей со сложной геометрической образующей.

Сформированные в ходе научной работы математические зависимости и расчетные уравнения позволяют просчитать кинематические составляющие процесса плазменного напыления, учитывают геометрическую составляющую поверхности детали, а также прогнозируют величину толщины плазменного слоя и температуру нагрева детали при газотермической обработке.

Выводы

Получены математические зависимости, позволяющие определить кинематику перемещения плазмотрона относительно обрабатываемой поверхности.

На основе кинематики инструмента (распылителя) установки плазменного напыления разработаны усовершенствованные уравнения прогнозирования толщины плазменного покрытия и температуры нагрева детали.

Литература

1. Нанесение покрытие плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белащенко и др. М.: Наука, 1990. 408 с.
2. Слюдеев К.А., Ляпин А.А. Расчет скорости и температуры порошка диоксида циркония, движущегося в плазменной воздушной струе // Молодежный научно-технический вестник. Электронный журнал. Вып. № 8. 2012.
3. Воронкова М.Н. Упрочнение и восстановление деталей оборудования промышленности строительных материалов плазменным напылением: дис. … канд. техн. наук: 05.03.06 / Воронкова Марина Николаевна. Белгород, 2005. 137 с.
4. Балановский А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. 180 с.
5. Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Пеньков Н.А. Применение технологии плазменного напыления для повышения эксплуатационной надежности сельхозмашин // Наука в Центральной России (Science in the central Russia). 2017. № 4 (28). С. 131–136.
6. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский, С.С. Самотугин, И.И. Пирч, В.И. Комар. К.: Тэхника, 1990. 109 с.
7. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. 360 с.
8. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко. Минск: Беларус. навука, 2011. 357 с.
9. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
10. Гевко Б.М. Технология изготовления спиралей шнеков. М.-Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. 128 с.
11. Моделирование кинематики плазменного напыления на сложнопрофильные поверхности / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 128. С. 133–139.

Поступила 10.07.2018; принята к публикации 28.09.2018

Информация об авторах

Жачкин Сергей Юрьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: zhach@list.ru

Краснова Марина Николаевна – канд. техн. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой автоматизированного оборудования машиностроительного производства, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: krasnovam27@mail.ru

Трифонов Григорий Игоревич – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), младший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), e-mail: grishakip@yandex.ru

Пеньков Никита Алексеевич - канд. техн. наук, научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), e-mail: myth_np_nikit@mail.ru

INFLUENCE OF KINEMATICS OF THE TOOL MOVEMENT ON THE WEAR-RESISTANT COATING FORMATION

S.Yu. Zhachkin[1], M.N. Krasnova[1], G.I. Trifonov[1,2], N.A. Pen'kov[2]

[1]Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
[2] Military Scientific Educational Center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy", Voronezh, Russia

Abstract: it is known from literary sources that the most used methods for the restoration of machine parts are the technologies with the use of highly concentrated energy flows, for example, gas-thermal surface treatment. In the field of gas-thermal surface treatment of parts, systems of equations are actively used to estimate the physical, mechanical and chemical features (parameters) of the coating the surface of parts. In this regard, the issues of developing improved systems of equations for estimating and predicting key parameters of the plasma spraying process come first in simulating the process of gas-thermal technology. In this paper, we consider the influence of kinematic regimes on the formation of a plasma coating on a complex-shaped surface of a part. In particular, the kinematics of applying a wear-resistant coating on the screw surface of the part was analyzed, and the effect of the coating speed on the thickness of the sprayed layer and the temperature of heating the part was considered. Compiled advanced calculation equations for predicting the thickness of the sprayed layer and the heating of the screw (complex-shaped) surface. The developed mathematical dependencies are planned to be used in the development of technological maps and subsequent correlations of the technology of applying plasma spraying on automated and robotic complexes when processing parts with complex geometrical generatrix

Key words: plasma spraying, speed, coating thickness, surface temperature, modeling, kinematics

References

1. Kudinov V.V., Pekshev P.Yu., Belashchenko V.E. et al. "Plasma coating" ("Nanesenie pokrytie plazmoy"), Moscow, Nauka, 1990, 408 p.

2. Slyudeev K.A., Lyapin A.A. "Calculation of the speed and temperature of zirconium dioxide powder, moving in a plasma air jet", *Electronic journal "Youth scientific and technical Bulletin" (Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik. Elektronnyy zhurnal),* 2012, vol. 8.

3. Voronkova M.N. "Strengthening and restoration of the equipment parts of the materials industry by plasma spraying: Cand. tech. sci. diss." ("Uprochnenie i vosstanovlenie detaley oborudovaniya promyshlennosti stroitel'nykh materialov plazmennym napyleniyem: dis. kand. tekhn. nauk"), Belgorod, 2005, 137 p.

4. Balanovskiy A.E. "Plasma surface hardening of metals" ("Plazmennoe poverkhnostnoe uprochnenie metallov"), Irkutsk, Publishing house of ISTU, 2006, 180 p.

5. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Pen'kov N.A. "Application of the technology of plasma spraying to improve the operational reliability of the machinery", *Science in the central Russia,* 2017, no. 4 (28), pp.131-136.

6. Leshchinskiy L.K., Samotugin S.S, Pirch I.I., Komar V.I. "Plasma surface hardening" ("Plazmennoe poverkhnostnoe uprochnenie"), Kiev, Tekhnika, 1990, 109 p.

7. Puzryakov A.F. "Theoretical bases of plasma spraying technology: manual" ("Teoreticheskie osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya: ucheb. posobie"), Moscow, Publishing house of Bauman MSTU, 2008, 360 p.

8. Il'yushchenko A.F., Shevtsov A.I., Okovityi V.A., Gromyko G.F. "Processes of formation of gas-thermal coatings and their modeling" ("Protsessy formirovaniya gazotermicheskikh pokrytiy i ikh modelirovanie"), Minsk, Belarus. Navuka, 2011, 357 p.

9. Grigoriev M.A. "Screw conveyors" ("Vintovye konveyery"), Moscow, Mashinostroenie, 1972, 184 p.

10. Gevko B.M. "Technology of production of spirals of the screws" ("Tekhnologiya izgotovleniya spiraley shnekov"), Moscow-Lviv, Vishcha shk., 1986, 128 p.

11. Zhachkin S.Yu., Trifonov G.I., Pen'kov N.A., Krasnova M.N. "Modeling of the plasma spraying kinematics on the figurine surface", *Trudy. GOSNITI,* 2017, vol. 128, pp. 133-139.

Submitted 10.07.2018; revised 28.09.2018

Information about the authors

Sergey Yu. Zhackin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: zhach@list.ru

Marina N. Krasnova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: krasnovam27@mail.ru

Gregoriy I. Trifonov, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), Junior Researcher, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy" (54 «A» Staryh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: grishakip@yandex.ru

Nikita. A. Pen'kov, Cand. Sc. (Technical), Researcher, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E.Zhukovsky and JU.A. Gagarin Military-Air academy" (54 «A» Staryh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: myth_np_nikit@mail.ru

Физика

УДК 538.956, 621.396.99

ВЛИЯНИЕ ЗАМЕЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИОНАМИ НИКЕЛЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕГНЕТОКЕРАМИКИ $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ СО СТРУКТУРОЙ ФАЗ АУРИВИЛЛИУСА

Н.А. Толстых, А.И. Бочаров, И.Ю. Кобяков, С.А. Гриднев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: по стандартной керамической технологии получен твёрдый раствор $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$, где x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4. В интервале температур от 25 до 600 ºС исследованы температурные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ на частоте 1 кГц; обнаружены аномалии, которые связываются с наличием структурного фазового перехода. Проверка выполнимости закона Кюри – Вейса показала размытие фазового перехода. Для его описания была выбрана модель флуктуаций состава Смоленского-Исупова. В рамках модели сделана оценка степени размытия фазового перехода в зависимости от концентрации никеля, с ростом которой размытие становится больше. Проведена оценка температурного коэффициента диэлектрической проницаемости в интервале температур от 25 до 100 ^oC, при которых обычно используются компоненты радиоэлектронной техники. Определен керамический материал с самыми низкими значениями температурного коэффициента диэлектрической проницаемости, который может быть востребован и использован для разработки и производства высокостабильных конденсаторов

Ключевые слова: сегнетокерамика, слоистый перовскит, фазовый переход, объем Кенцига, температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, фазы Ауривиллиуса

Введение

На данный момент в производстве сегнетоэлектрических материалов по керамической технологии преобладают соединения со структурой перовскита. Существует три перовскитоподобных оксида со слоистой микроструктурой: фазы Дион-Якобсона ($[A_mB_mO_{3m+2}]$), фазы Раддлесден-Поппера ($[A_{m+1}B_mO_{3m+1}]$) и фазы Ауривиллиуса (ФА) ($[A_{m-1}Bi_2B_mO_{3m+3}]$), где m – количество перовскитных слоев. Наибольший интерес представляют ФА. Данный факт связан с перспективой их применения в устройствах энергонезависимой сегнетоэлектрической памяти (FeRAM), ионных проводников, мультиферроиков, высокостабильных конденсаторов [1]. Большой набор характеристик, присущих только данным соединениям, и позволяет прогнозировать их потенциальное применение в широком ряде устройств.

Целью работы являлось получение твердого раствора $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ (x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4), изучение структуры и исследование особенностей его диэлектрических свойств.

© Толстых Н.А., Бочаров А.И., Кобяков И.Ю., Гриднев С.А., 2018

Методика получения

Исследуемые образцы $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$, где x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4, изготавливались по двухстадийной керамической технологии, состоящей из стадии синтеза и стадии спекания [2]. Порошки оксидов Bi_2O_3, TiO_2, Ni_2O_3, Fe_2O_3 стали исходными материалами для синтеза и брались в рассчитанном стехиометрическом соотношении.

Расчет шихты проводился на 10 грамм состава. Порошки предварительно просушивались при температуре 110 °С в течение 3 часов. Перемешивание шихты проводилось в планетарной мельнице. Синтез образцов проводился путем обжига в атмосфере воздуха в течение 4 часов при температуре 800 °С.

Заготовки, полученные после синтеза, дробились вручную в ступке, а после производился помол при помощи планетарной мельницы. Спекание проводилось в течение 5 часов при температуре 860 °С в атмосфере воздуха. Для получения сверхплотных образцов условия спекания подвергались тщательному контролю.

Электроды наносились посредством вжигания серебряной пасты на поверхности с наибольшим радиусом. Температура вжигания составляла 770 °С, а время 30 мин.

Обсуждение результатов

На аппарате Bruker Phaser D2 [3] был проведен рентгеноструктурный анализ (Cu K_α – излучение) изучаемых материалов, который показал однофазность всех образцов и их принадлежность к орторомбической группе симметрии (рис. 1). Установлено, что количество перовскитоподобных слоев у всех составов m = 5.

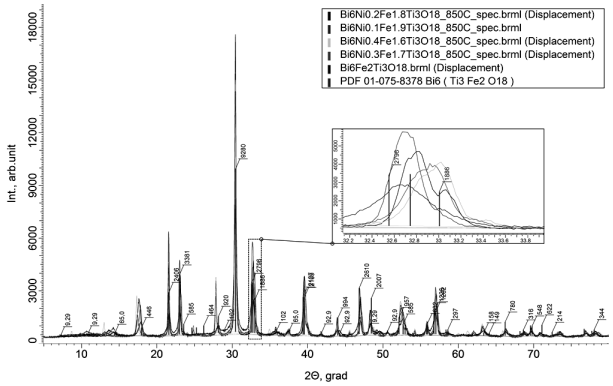


Рис. 1. Рентгенограмма сегнетокерамики с формулой $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$

На рис. 2 и 3 представлены результаты изучения поведения кривых действительной части диэлектрической проницаемости ε′ и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ при изменении температуры.

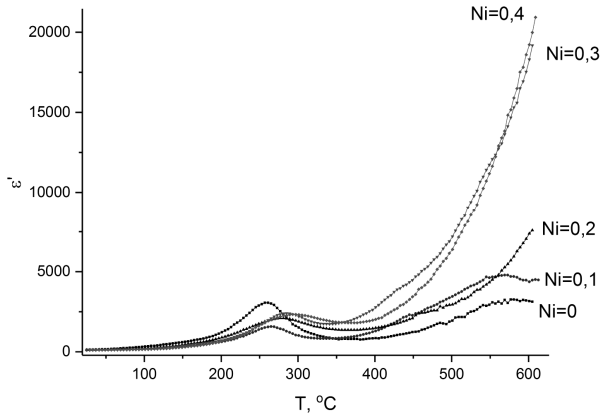


Рис. 2. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ε′ для слоистого перовскита $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ с различным содержанием x на частоте 1 кГц

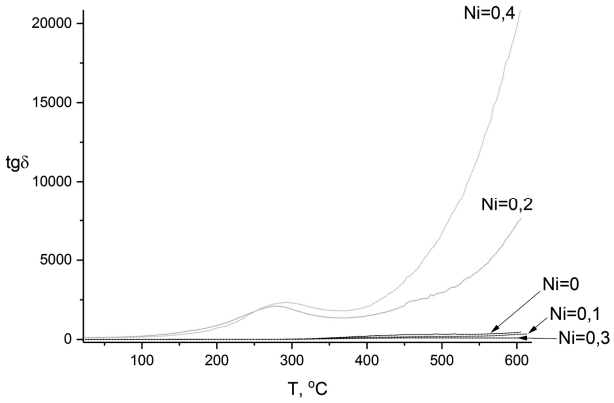


Рис. 3. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для слоистого перовскита $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ с различным содержанием x на частоте 1 кГц

Анализ полученных зависимостей диэлектрической проницаемости показал смещение максимума ε′ в область высоких температур при увеличении концентрации никеля. С полученными данными хорошо коррелируют результаты исследований тангенса угла диэлектрических потерь tgδ.

Полученные данные позволяют оценить выполнение закона Кюри-Вейсса

$$\varepsilon' = C_w / (T - T_m) \qquad (1)$$

в температурных областях максимумов диэлектрической проницаемости. Результаты представлены на рис. 4.

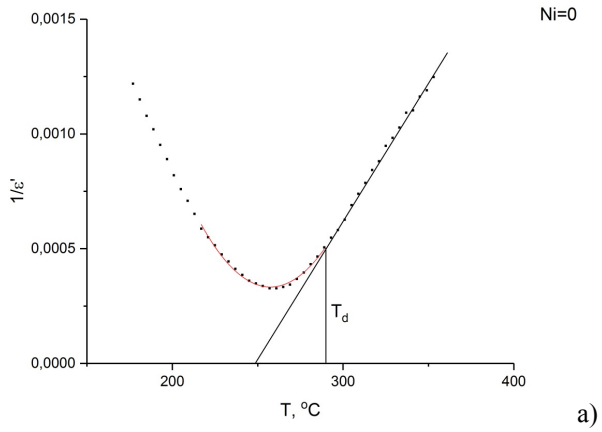


Рис. 4. Зависимости диэлектрической проницаемости от температуры в координатах 1/ε от T для слоистого перовскита $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ с различной массовой долей x = 0 (а); 0,1 (б); 0,2 (в); 0,3 (г); 0,4 (д)

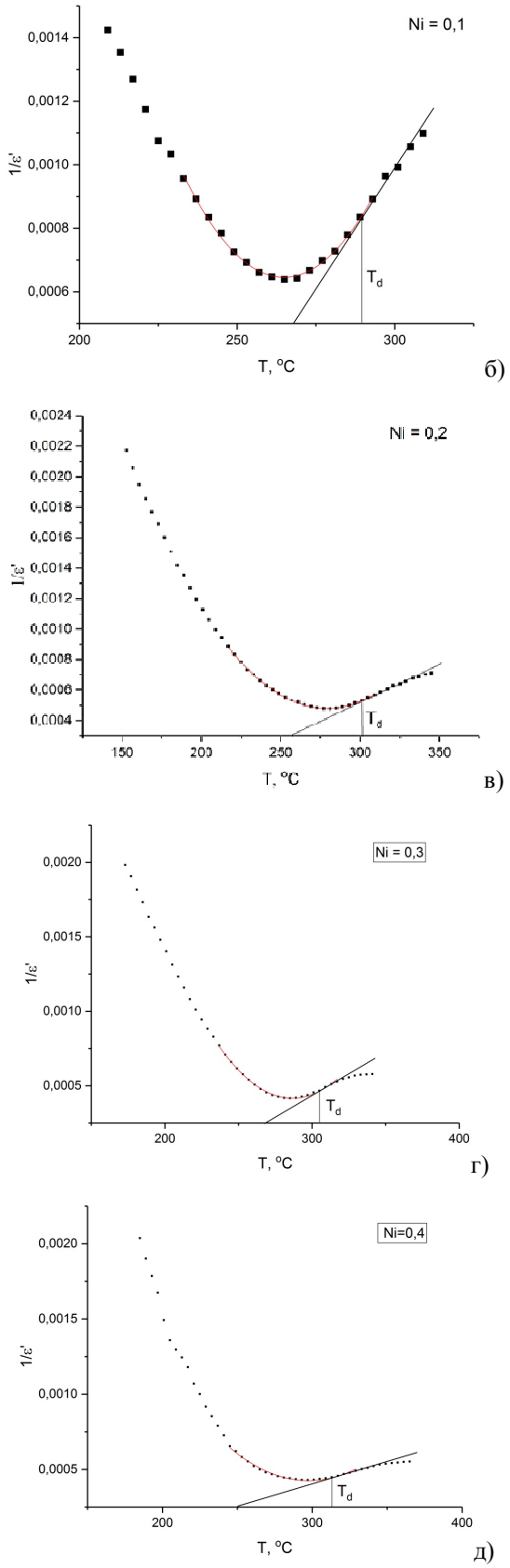


Рис. 4. Зависимости диэлектрической проницаемости от температуры в координатах 1/ε от T для слоистого перовскита $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ с различной массовой долей x = 0 (а); 0,1 (б); 0,2 (в); 0,3 (г); 0,4 (д) (продолжение)

По зависимостям 1/ε от T определен ряд параметров, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры материала, определенные из закона Кюри-Вейсса

x	T_0, °C	T_d, °C	C_w	T_m, °C	ε_m
0	248	290	7,03·104	257	3019
0,1	268	289	3,63·104	265	1557
0,2	257	301	5,8·104	279	2076
0,3	305	305	5,08·104	287	2391
0,4	250	313	5,46·104	298	2362

где T_0 – температура Кюри; T_d – температура Бернса; C_w – константа Кюри – Вейсса; T_m – температура, соответствующая максимуму ε; ε_m – значение диэлектрической проницаемости при температуре T_m.

Из рисунков видно, что широкая область температур в окрестности максимума диэлектрической проницаемости не соответствует линейному закону Кюри – Вейсса, предсказываемому термодинамикой. Следовательно, можно предположить, что в этой области фазовый переход является размытым. Для описания сегнетоэлектрического размытого фазового перехода существует ряд моделей: модель флуктуаций состава; модель случайных полей; модель статистического распределения катионов; модель случайных полей – случайных связей.

Поскольку исследуемый материал представляет собой твердый раствор замещения со случайным распределением примеси Ni по позициям A и B перовскитной структуры ABO_3, то была выбрана модель флуктуаций состава, которая утверждает, что для сегнетоэлектриков, у которых фазовый переход размыт выше температуры максимума T_m, диэлектрическая проницаемость ε зависит от температуры не по линейному закону Кюри – Вейсса, а по квадратичному закону:

$$\frac{1}{\varepsilon}=\frac{1}{\varepsilon_m}+\frac{(T-T_m)^2}{2\cdot\varepsilon_m\cdot\sigma^2} \qquad (2)$$

где σ – параметр, характеризующий степень размытия фазового перехода.

Для проверки выполнимости квадратичного закона (2) зависимости ε(T) построены в координатах 1/ε от $(T-T_m)^2$, представлены на рис. 5.

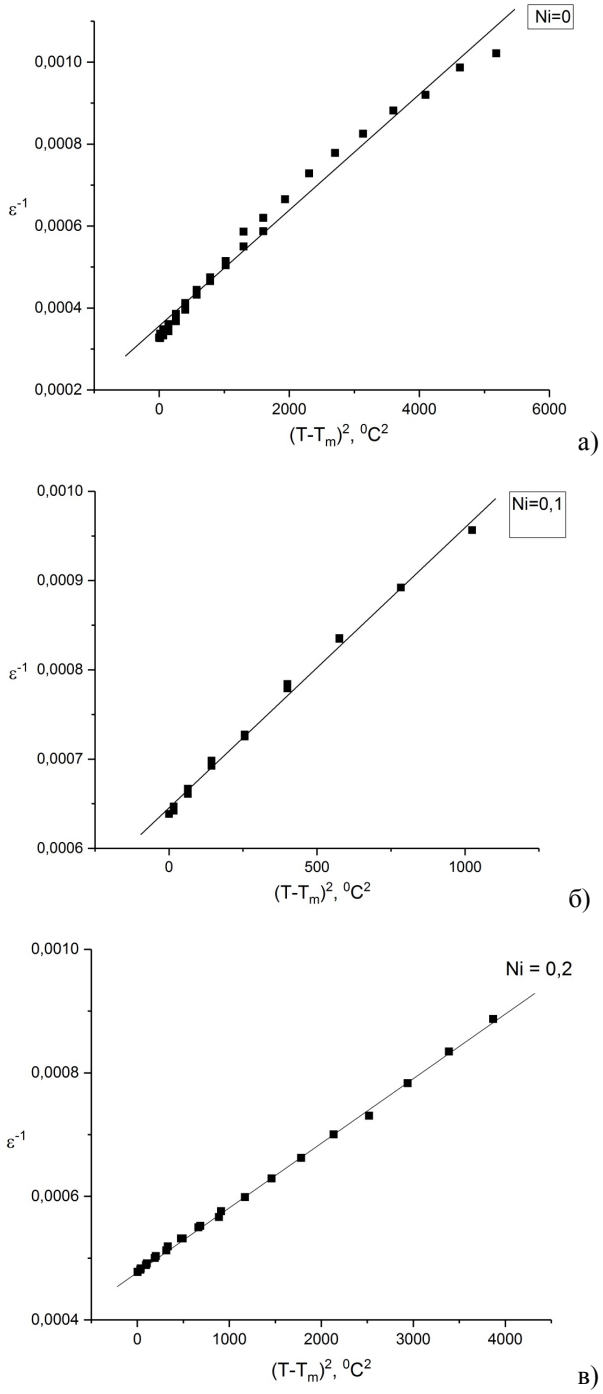


Рис. 5. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости в координатах 1/ε от $(T-T_m)^2$ для слоистого перовскита $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ с различной массовой долей x = 0 (а); 0,1 (б); 0,2 (в); 0,3 (г); 0,4 (д)

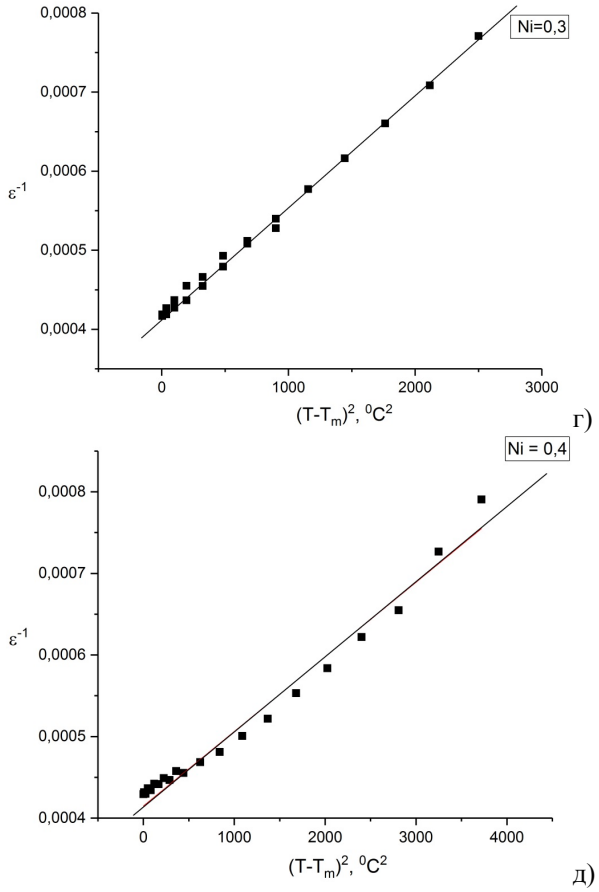


Рис. 5. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости в координатах 1/ε от $(T-T_m)^2$ для слоистого перовскита $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ с различной массовой долей x = 0 (а); 0,1 (б); 0,2 (в); 0,3 (г); 0,4 (д) (продолжение)

Видно, что точки, полученные из эксперимента, очень хорошо ложатся на прямые линии, из угловых коэффициентов которых можно определить параметр размытия σ. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость параметра размытия σ от концентрации никеля

x	σ, °C
0	31
0,1	32
0,2	48
0,3	39
0,4	52

Согласно модели флуктуаций состава, предложенной Смоленским и Исуповым, полярная фаза в случае размытого фазового перехода возникает при температуре Бернса в виде локальных полярных областей в параэлектрической матрице, количество областей при понижении температуры увеличивается, они вза-

имодействуют между собой, сливаются и при некоторой температуре полностью реализуется полярная фаза. Определение по модели объема критического зародыша дало значение 10^{-22} см^3, которое по порядку величины близко к величине объема Кенцига [4].

Исходя из приведенных выше результатов, были проведены исследования стабильности диэлектрической проницаемости в интервале температур от 25 до 100 ^oC, при которых обычно используются компоненты радиоэлектронной техники. Для этого был определен температурный коэффициент диэлектрической проницаемости (ТКε′), который определяется по формуле:

$$ТКε' = Δε / (ε \times ΔT) [\% / {}^0C], \quad (3)$$

и построена его зависимость от температуры для каждого из составов (рис. 6).

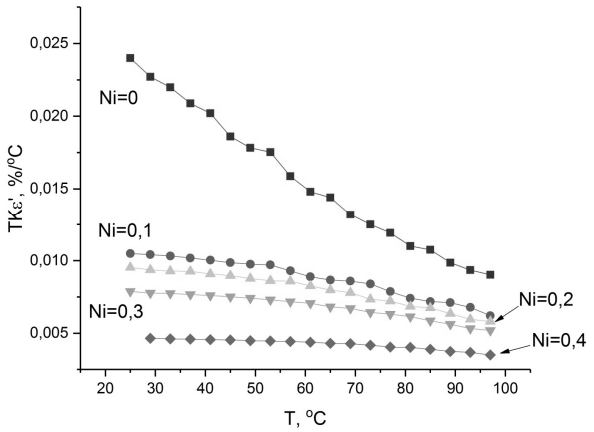


Рис. 6. Температурные зависимости ТКε′ для слоистого перовскита $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ с различным содержанием x

Из рисунка видно, что добавление никеля, замещающего железо, существенно увеличивает температурную стабильность диэлектрической проницаемости ε′. По полученным зависимостям была проведена оценка величины ТКε′ в исследуемом интервале температур, которая приведена в табл. 3.

Таблица 3

Значения ТКε′ в исследуемом интервале температур при разных x

x	ΔT, ^oC	ТКε′, %/^oC
0	72	0,015
0,1	72	0,0043
0,2	72	0,0037
0,3	72	0,0027
0,4	68	0,0012

Из табл. 3 видно, что с ростом температуры самые незначительные изменения ε′ происходят в материале с наибольшей концентрацией никеля. Данный факт подтверждает увеличение температурной стабильности материала при значительной добавке никеля.

Керамические материалы со столь низкими значениями ТКε′ могут быть востребованы и использованы для разработки и производства высокостабильных конденсаторов, применяемых, например, в контурах задающих генераторов радиоэлектронной аппаратуры.

Заключение

По двухстадийной керамической технологии синтезированы образцы слоистого перовскита со структурой фаз Ауривилиуса $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ с различной концентрацией никеля (x = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4).

В результате рентгеновских дифракционных исследований выяснилось, что исследуемые составы являются однофазными и принадлежат к орторомбической группе симметрии. Также установлено, что количество перовскитоподобных слоев у всех составов m= 5.

Анализ полученных зависимостей диэлектрической проницаемости показал смещение максимума в область высоких температур при увеличении концентрации никеля в составе. С полученными данными хорошо коррелируют результаты исследований тангенса угла диэлектрических потерь tgδ.

Проверка выполнимости закона Кюри – Вейсса показала, что в широкой области температур в окрестности максимума диэлектрической проницаемости этот закон не выполняется. Данный факт свидетельствует о том, что фазовый переход является размытым. Для его описания была выбрана модель флуктуаций состава Смоленского-Исупова. В рамках модели сделана оценка степени размытия фазового перехода в зависимости от концентрации никеля в составе, с ростом которой размытие становится больше. Определен объем критического зародыша полярной области, равный 10^{-22} см^3, который по порядку величины близок к величине объема Кенцига.

Проведена оценка температурного коэффициента диэлектрической проницаемости в интервале температур от 25 до 100 ^oC. Полученное значение ТКε′ = $(12\text{-}40)\cdot10^{-6}$ является привлекательным для использования в радиоэлектронике. Обнаружено, что с увеличением добавки никеля в исследуемый состав стабильность материала возрастает, что расширяет возможности его практического применения.

Литература

1. Диэлектрические свойства перовскитной керамики $Bi(Mg_{1/2}Ti_{1/2})O_3$ по данным импеданс-спектроскопии / Н.М. Олехнович, А.Н. Салак, А.В. Пушкарев, Ю.В. Радюш, Н.П. Вышатко, Д.Д. Халявин, V.M. Ferreira // ФТТ. 2009. Т. 51. № 3. С. 543 – 553.

2. Глозман И.А. Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972. 288 с.

3. Bruker A X S 2008 TOPAS V4: General Profile and Structure Analysis Software for Powder Diffraction Data.– User's Manual (Karlsruhe: Bruker AXS).

4. Kanzig W. Rontgenuntersuchungen uber die seignetteelekrizitat von bariumtitanat // Helv. Phys. Acta. 1951. Vol. 24. №. 2. P. 175.

Поступила 11.07.2018; принята к публикации 11.09.2018

Информация об авторах

Толстых Никита Александрович – канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89507546762, e-mail: mad_nik@bk.ru
Бочаров Алексей Игоревич – ведущий инженер, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89202130649, e-mail: lekha.bocharoff@yandex.ru
Кобяков Иван Юрьевич – магистр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89204285448, e-mail: kobyakov.vania@yandex.ru
Гриднев Станислав Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79623302357, e-mail: s_gridnev@mail.ru

EFFECT OF IRON REPLACEMENT BY NICKEL IONS ON DIELECTRIC PROPERTIES OF FERROELECTRIC CERAMICS $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$ WITH THE AURIVILLIUS PHASE STRUCTURE

N.A. Tolstykh, A.I. Bocharov, I.Yu. Kobyakov, S.A. Gridnev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a solid solution of $Bi_6Ti_3Fe_{2-x}Ni_xO_{18}$, where x = 0; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4, was prepared by standard ceramic technology. Temperature dependences of the dielectric constant ε and the loss tangent tgδ were studied at a frequency of 1 kHz in the temperature interval from 25 to 600 ºC. The observed ε and tgδ anomalies are associated with the presence of a structural phase transition in these samples. A verification of the Curie-Weiss law showed the smearing of the phase transition. For the description of the diffused phase transition, the Smolenskiy-Isupov model of the composition fluctuations was chosen. Within the framework of the model, an estimation of the phase transition smearing degree as a function of the nickel concentration was made, the smearing degree becomes larger with nickel content. The dependence of the temperature coefficient of the dielectric constant in the temperature range from 25 to 100 ^oC was studied for all compositions. The revealed ceramic material with the lowest values of the temperature coefficient of dielectric constant can be used for the development and production of highly stable capacitors for radio and electronics devices

Key words: ferroelectric ceramics, layered perovskite, phase transition, Kanzig volume, temperature coefficient of permittivity, Aurivillius phase

References

1. Olekhnovich N.M., Salak A.N., Pushkarev A.V., Radyush Yu.V., Vyshatko N.P., Khalyavin D.D., Ferreira V.M. "Dielectric properties of the perovskite ceramics $Bi(Mg_{1/2}Ti_{1/2})O_3$ from the impedance spectroscopy data", *FTT*, 2009, vol. 51, no. 3, pp. 543-553.
2. Glozman I.A., "Piezoceramics" ("P'ezokeramika"), Moscow, Energiya, 1972, 288 p.
3. Bruker A X S 2008 TOPAS V4: General profile and structure analysis software for powder diffraction data. User's Manual, Karlsruhe, Bruker AXS
4. Kanzig W. "Rontgenuntersuchungen uber die seignetteelekrizitat von bariumtitanat", *Helv. Phys. Acta.* 1951, vol. 24, no. 2 p. 175.

Submitted 11.07.2018; revised 11.09.2018

Information about the authors

Stanislav A. Gridnev, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: s_gridnev@mail.ru
Nikita A. Tolstykh, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Lead Engineer, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: mad_nik@bk.ru
Ivan Yu. Kobyakov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kobyakov.vania@yandex.ru
Aleksey I. Bocharov, Lead Engineer, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: lekha.bocharoff@yandex.ru

УДК 538.91: 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Re-Gd

А.В. Бондарев, И.Л. Батаронов, И.М. Пашуева

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: методом молекулярной динамики выполнено компьютерное моделирование атомной структуры аморфных сплавов Re-Gd в широком диапазоне концентраций. Межатомное взаимодействие описывалось эмпирическим полиномиальным потенциалом. Параметры топологического ближнего порядка, полученные в результате моделирования, находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами. Локальное атомное окружение исследовалось с помощью многогранников Вороного. Получены распределения топологических индексов многогранников Вороного. Среди многогранников Вороного, центрами которых являются атомы рения, большую долю составляют многогранники 0–0–12–0, характерные для икосаэдрического ближнего порядка. Исследована зависимость доли многогранников Вороного с топологическим индексом 0–0–12–0 от концентрации атомов гадолиния. Эта зависимость имеет плавный максимум, приходящийся на середину концентрационного интервала. Исследована статистика числа граней и числа сторон граней многогранников Вороного. Рассмотрена зависимость указанных распределений от состава сплава. Вычислены среднее число граней многогранников Вороного и среднее число их сторон. С увеличением содержания атомов гадолиния для многогранников Вороного, центрами которых являются как атомы Re, так и атомы Gd, среднее число граней и среднее число сторон линейно убывают

Ключевые слова: молекулярная динамика, аморфные сплавы, многогранники Вороного, икосаэдры

Введение

Аморфные сплавы на основе редкоземельных металлов обладают уникальным комплексом физических свойств, в связи с чем привлекают внимание исследователей. Для лучшего понимания данных свойств и теоретического описания аморфного состояния необходима детальная информация об атомной структуре аморфных сплавов (АС). Дифракционные методы изучения атомной структуры АС дают возможность получить только усредненную информацию (функции радиального распределения и параметры ближнего порядка). В настоящее время наиболее эффективным методом исследования атомной структуры АС является молекулярно-динамическое моделирование [1]. Одним из наиболее информативных методов анализа атомной структуры аморфных материалов является статистико-геометрический анализ, основанный на построении и исследовании многогранников Вороного (МВ) [2, 3].

Методика компьютерного моделирования

Атомная структура аморфных сплавов системы Re_{100-x}-Gd_x (x = 12, 37, 61, 67, 93 ат. %) была изучена методом классической молекулярной динамики. Количество атомов во всех моделях равнялось 10 000. В начальный момент атомы двух сортов случайно располагались в основном кубе с периодическими граничными условиями. Межатомное взаимодействие задавалось эмпирическим потенциалом, представленным в виде полинома четвертой степени [4]. Численное интегрирование уравнений движения проводилось с использованием алгоритма Верле в скоростной форме. Шаг интегрирования равнялся $2 \cdot 10^{-15}$ с. Приведение системы к равновесному состоянию осуществлялось в течение 7000 шагов при температуре $T = 300$ К.

Для моделей АС Re-Gd основные структурные характеристики (функции радиального распределения и параметры топологического ближнего порядка) с хорошей точностью согласуются с результатами эксперимента по дифракции рентгеновских лучей [5, 6].

В полученных моделях вокруг каждого атома были построены многогранники Вороного. Многогранник Вороного является областью пространства, характеризующейся тем, что все ее точки находятся ближе к центру выбранного атома, чем к центру любого другого атома в данной системе [2].

Результаты и их обсуждение

Для изучения атомной структуры компьютерных моделей АС $Re_{100-x}Gd_x$ (x = 12, 37, 61, 93 ат. %) проведен статистико-геометрический анализ многогранников Вороного, построенных как вокруг атомов Re, так и вокруг атомов Gd. В данной работе будет изложен анализ МВ для

© Бондарев А.В., Батаронов И.Л., Пашуева И.М., 2018

выявления как общих, так и специфических черт в локальном окружении атомов двух компонентов. Следует заметить, что в АС системы Re-Gd диаметры атомов компонентов существенно различаются: $d_{\mathrm{Re}} = 0,274$ нм, $d_{\mathrm{Gd}} = 0,358$ нм.

Построены распределения МВ по топологическим индексам $n_3 - n_4 - n_5 - n_6$, где n_i обозначает количество i-угольных граней многогранника Вороного (рис. 1–3). На рисунках показаны лишь те типы МВ, содержание которых составляет более 2 % от общего числа МВ в данной системе.

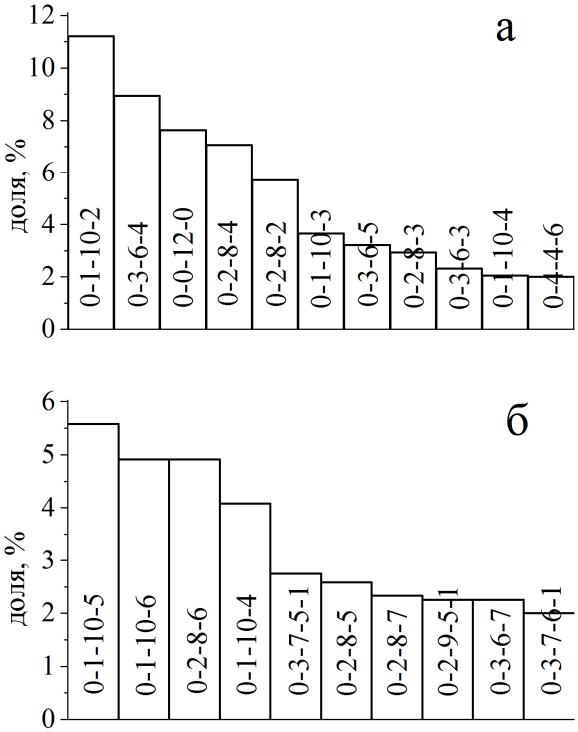


Рис. 1. Распределение многогранников Вороного по типам для АС $Re_{88}Gd_{12}$: *а* – для МВ, построенных вокруг атомов Re; *б* – для МВ, построенных вокруг атомов Gd

Для МВ, построенных вокруг атомов рения, от 7 до 10 ат. % составляют многогранники с топологическим индексом 0-0-12-0 (пентагональные додекаэдры). Координационные многогранники, соответствующие данным МВ, являются икосаэдрами. Также наиболее часто встречаются многогранники 0-1-10-2, 0-0-12-0, 0-3-6-4, 0-2-8-2, 0-2-8-4, 0-1-10-3, 0-1-10-4. МВ с топологическими индексами 0-2-8-2, 0-1-10-2, 0-1-10-3, 0-2-8-4 получаются с помощью незначительной модификации многогранника 0-0-12-0.

В частности, индекс 0-1-10-2 получается заменой одного ребра додекаэдра новой четырёхугольной гранью. В результате две смежные пятиугольные грани додекаэдра становятся шестиугольными [2]. Данные МВ соответствуют координационным многогранникам, которые являются искаженными икосаэдрами.

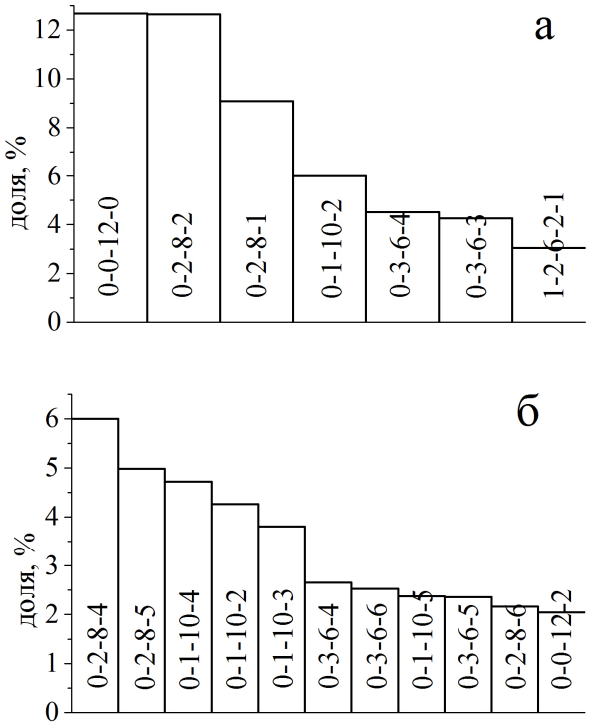


Рис. 2. Распределение многогранников Вороного по типам для АС $Re_{39}Gd_{61}$: *а* – для МВ, построенных вокруг атомов Re; *б* – для МВ, построенных вокруг атомов Gd

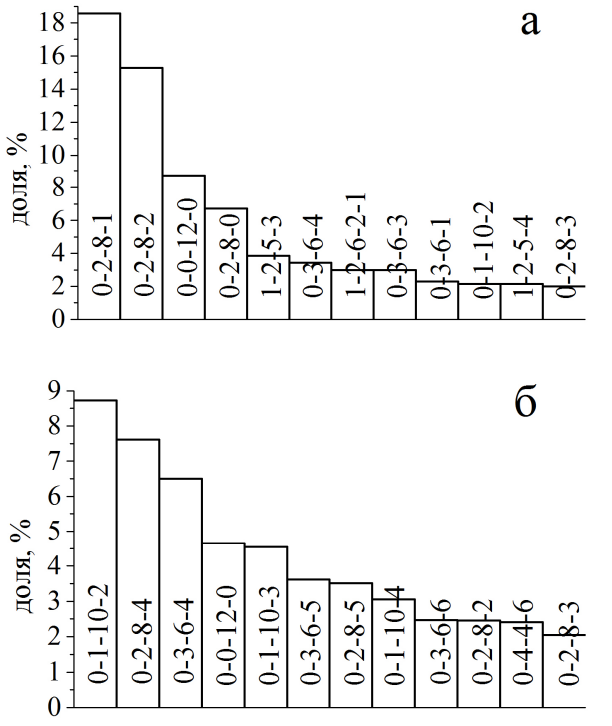


Рис. 3. Распределение многогранников Вороного по типам для АС Re_7Gd_{93}: *а* – для МВ, построенных вокруг атомов Re; *б* – для МВ, построенных вокруг атомов Gd

Следовательно, в АС Re-Gd вокруг атомов рения, имеющих меньший диаметр, преобладает икосаэдрический ближний порядок. Для АС с содержанием атомов Gd, близким к 50 %, увеличивается общее число типов МВ. При этом увеличивается среднеквадратичное отклонение атомов в пределах первой координационной сферы.

На рис. 4 приведена зависимость доли многогранников Вороного 0-0-12-0, среди МВ, построенных вокруг атомов Re, от концентрации атомов Gd в АС Re-Gd. На этой зависимости наблюдается максимум при x = 37–67 ат. % Gd, что обусловлено более высоким содержанием атомов рения, имеющих координационное число 12 для данных составов (см. таблицу) и повышенной долей двенадцатигранников среди многогранников Вороного. Среди них наименьшей энергией обладает икосаэдр, чей многогранник Вороного имеет топологический индекс 0-0-12-0.

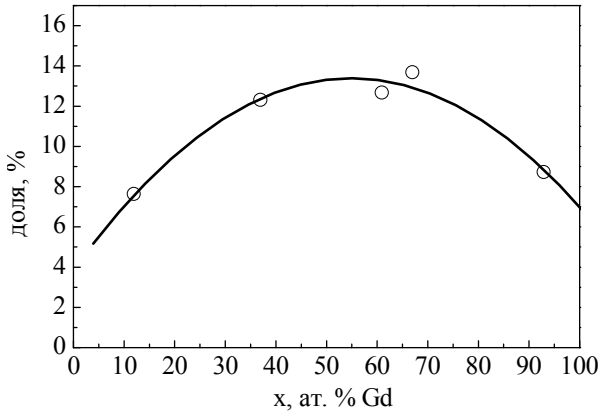


Рис. 4. Зависимость доли многогранников Вороного 0-0-12-0 среди МВ, построенных вокруг атомов Re, от концентрации атомов Gd в АС Re_{100-x}-Gd_x

Среди МВ, построенных вокруг атомов Gd, многогранники с топологическим индексом 0-0-12-0 практически отсутствуют. Наиболее распространенными являются МВ с топологическими индексами 0-2-8-4, 0-1-10-2, 0-3-6-4, 0-3-6-5, 0-2-8-5, 0-2-8-6, 0-1-10-4. При этом ни один из типов МВ не преобладает, частота каждого МВ ни для одного состава не превышает 9 %. Отсутствие локального икосаэдрического окружения атомов гадолиния обусловлено тем, что атомы, имеющие больший диаметр (Gd), окружены как атомами того же типа, так и атомами, имеющими меньший диаметр (Re). Следовательно, атомы Gd окружены в среднем 14–16 соседями (см. таблицу), а, значит, координационные многогранники, преимущественно окружающие атомы Gd, отличны от икосаэдров.

На рис. 5 для данных моделей представлены распределения МВ по числу граней $n_F(F)$. На рис. 6 представлены распределения граней МВ по числу сторон $n_S(S)$.

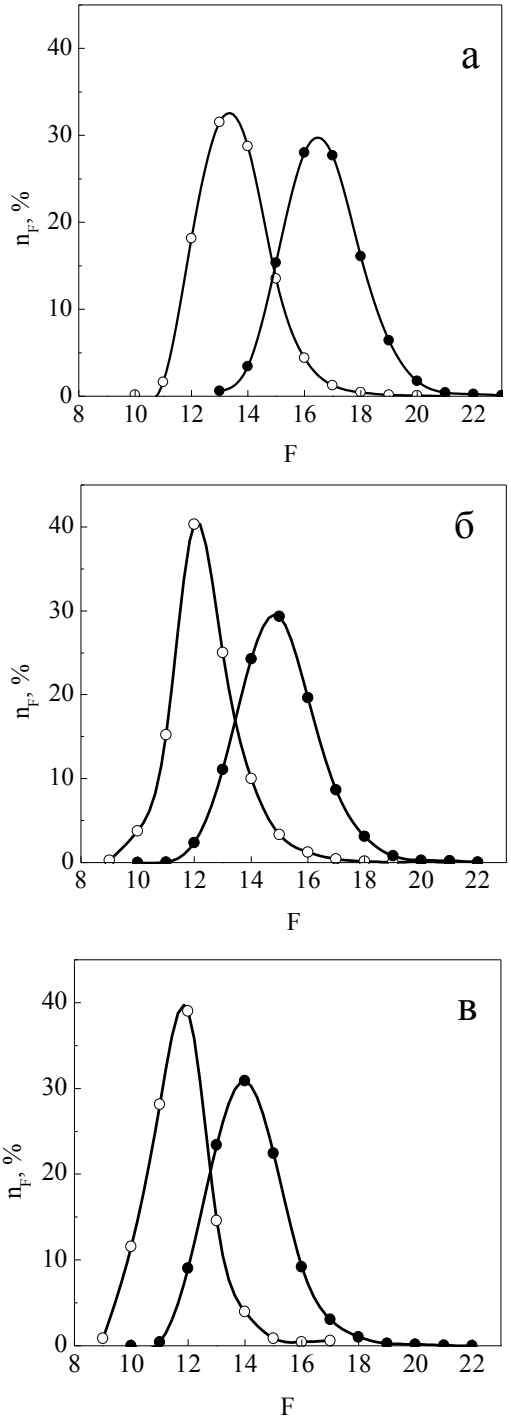


Рис. 5. Распределения многогранников Вороного по числу граней для АС Re_{100-x}-Gd_x: *а* – x = 12, *б* – x = 61, *в* – x = 93 ат. % Gd. Белые символы соответствуют МВ, построенным вокруг атомов Re, черные символы – вокруг атомов Gd; *F* – число граней МВ

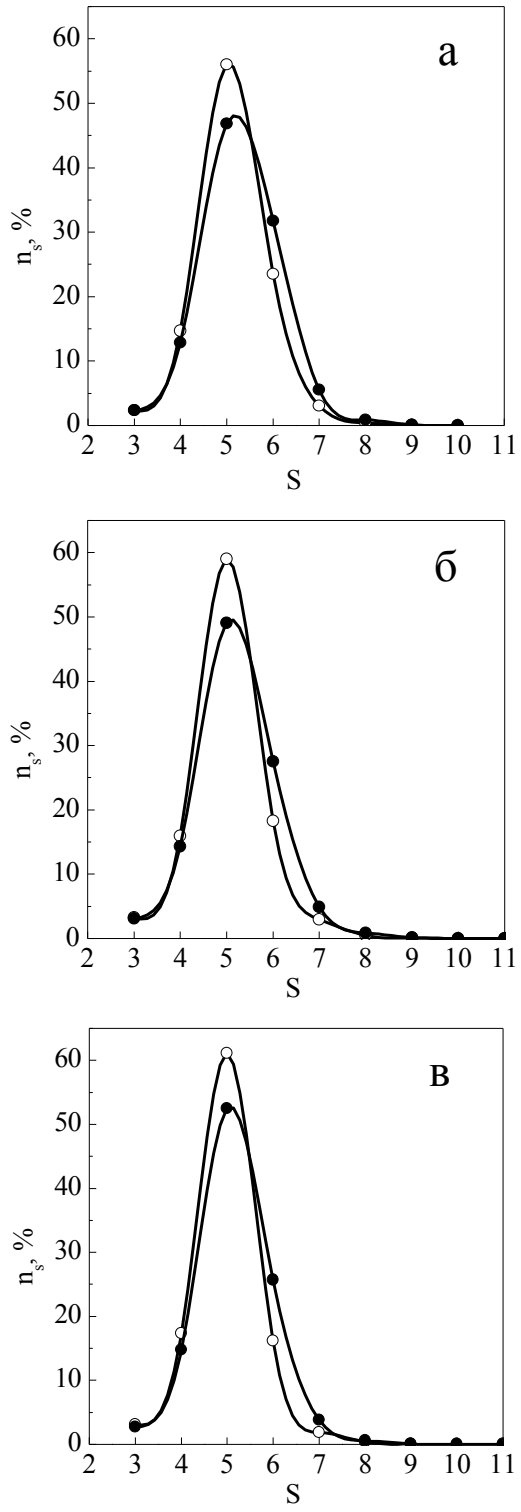


Рис. 6. Распределение граней многогранников Вороного по числу сторон для АС Re_{100-x}-Gd_x: *а* – x = 12, *б* – x = 61, *в* – x = 93 ат. % Gd. Белые символы соответствуют МВ, построенным вокруг атомов Re, черные символы – вокруг атомов Gd; *S* – число сторон граней МВ

Для АС Re-Gd во всем исследованном интервале концентраций распределения многогранников Вороного по числу граней практически симметричны относительно максимума. При приближении состава сплавов к 50 ат. % Gd рассмотренные распределения существенно не изменяются. Общее число типов многогранников Вороного возрастает, при этом наблюдается корреляция с ростом среднеквадратического отклонения положений атомов, что связано с увеличением атомного топологического беспорядка.

Распределения граней многогранников Вороного по числу сторон имеют вид, типичный для аморфных металлов. Высокое содержание пятиугольных граней и малая доля треугольных граней характерны для аморфного состояния [2].

Для моделей аморфных сплавов Re-Gd были рассчитаны среднее число граней многогранников Вороного $\langle F \rangle$ и среднее число сторон граней МВ $\langle S \rangle$ (см. таблицу).

Среднее число граней $\langle F \rangle$ и среднее число сторон $\langle S \rangle$ граней МВ для АС Re-Gd

Сплавы	$\langle F \rangle$		$\langle S \rangle$	
	Вокруг Re	Вокруг Gd	Вокруг Re	Вокруг Gd
$Re_{88}Gd_{12}$	13,56	16,66	5,11	5,28
$Re_{63}Gd_{37}$	12,94	15,69	5,07	5,24
$Re_{39}Gd_{61}$	12,41	14,99	5,03	5,20
$Re_{33}Gd_{67}$	12,29	14,84	5,02	5,19
Re_7Gd_{93}	11,76	14,14	4,98	5,1

Как видно из таблицы, для МВ, построенных и вокруг атомов рения, и вокруг атомов гадолиния, величины $\langle F \rangle$ и $\langle S \rangle$ линейно уменьшаются с увеличением содержания атомов Gd.

Заключение

В работе проведен анализ атомной структуры аморфных сплавов Re_{100-x}-Gd_x (x = 12, 37, 61, 67, 93 ат. %) с помощью многогранников Вороного. Исследована зависимость доли МВ с топологическим индексом 0–0–12–0, которые характеризуют икосаэдрическое локальное атомное окружение, среди МВ, построенных вокруг атомов Re, от содержания атомов Gd. Эта зависимость имеет плавный максимум, приходящийся на середину концентрационного интервала. Среди многогранников Вороного, построенных вокруг атомов гадолиния, практически отсутствуют МВ типа 0–0–12–0. Различное локальное

окружение атомов Re и Gd объясняется существенным различием атомных диаметров компонентов.

Литература

1. Белащенко Д.К. Компьютерное моделирование жидких и аморфных веществ. М.: МИСиС, 2005. 408 с.

2. Медведев Н.Н. Метод Вороного–Делоне в исследовании структуры некристаллических систем. Новосибирск: Изд. СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 2000. 214 с.

3. Полухин В.А., Ватолин Н.А. Моделирование аморфных металлов. М.: Наука, 1985. 288 с.

4. Батаронов И.Л., Бондарев А.В., Бармин Ю.В. Компьютерное моделирование атомной структуры аморфных металлических сплавов // Известия РАН. Серия физическая. 2000. Т. 64. № 9. С. 1666-1670.

5. Статистико-геометрический анализ атомной структуры аморфных сплавов Re-Gd / А.В. Бондарев, И.Л. Батаронов, В.В. Ожерельев, Ю.В. Бармин // Физико-математическое моделирование систем: материалы XII Междунар. Семинара. Воронеж, 2015. Ч. 3. С. 20-24.

6. Применение теории протекания для анализа атомной структуры аморфных сплавов на основе рения / А.В. Бондарев, Ю.В. Бармин, И.Л. Батаронов, В.В. Ожерельев, Д.В. Уразов, Е.В. Лебединская, О.А. Кордин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2006. Т. 2. № 8. С. 48-51.

Поступила 27.06.2018; принята к публикации 01.10.2018

Информация об авторах

Бондарев Алексей Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bondarev_a_v@mail.ru

Батаронов Игорь Леонидович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ibat@mail.ru

Пашуева Ирина Михайловна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vapushka@yandex.ru

MOLECULAR-DYNAMICS SIMULATION OF ATOMIC STRUCTURE OF AMORPHOUS ALLOYS OF A Re-Gd SYSTEM

A.V. Bondarev, I.L. Bataronov, I.M. Pashueva

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: using the molecular dynamics method, we carried out a computer simulation of atomic structure of Re-Gd amorphous alloys in a wide compositional region. The interatomic interaction was described by an empirical polynomial potential. The parameters of topological short-range order obtained in the result of the simulation are in good agreement with the experimental results. The local atomic arrangement was studied with the help of the Voronoi polyhedra. The distributions of the topologycal indices of the Voronoi polyhedra were obtained. Among the polyhedra, the centres of which are the rhenium atoms, the significant part are polyhedra with the topological index 0–0–12–0 typical for the local icosahedral surrounding. We studied the dependence of the fraction of the Voronoi polyhedra with the topological index 0–0–12–0 on the concentration of gadolinium atoms. This dependence has the smooth maximum in the middle of the concentration interval. The statistics of the face number and of the side number of the Voronoi polyhedra were studied. The dependencies of these distributions on the composition of the alloy were studied. The average values of the number of faces and the average number of sides of the Voronoi polyhedra were calculated. With the increase of concentration of the Gd atoms for the Voronoi polyhedra constructed around the Re atoms as well as the Gd atoms, the average number of faces and the average number of sides of the faces decrease linearly

Key words: molecular dynamics, amorphous alloys, Voronoi polyhedra, icosahedra

References

1. Belashchenko D.K. “Computer simulation of liquid and amorphous substances” (“Komp’yuternoe modelirovanie zhidkikh i amorfnykh veshchestv”), Moscow, MISiS, 2005, 408 p.

2. Medvedev N.N. “The Voronoi–Delauney method in the study of the structure of non-crystalline systems” (“Metod Voronogo-Delone v issledovanii struktury nekristallicheskikh system”), Novosibirsk, SO RAN, NITS OIGGM, 2000, 214 p.

3. Polukhin V.A., Vatolin N.A. “Simulation of amorphous metals” (“Modelirovanie amorfnykh metallov”), Moscow, Nauka, 1985, 288 p.

4. Bataronov I.L., Bondarev A.V., Barmin Yu.V. “Computer simulation of atomic structure of amorphous metallic alloys”, *Proc. of the Russian Academy of Sciences. Physics (Izvestiya RAN, Seriya Fizicheskaya)*, 2000, vol. 64, no. 9, pp. 1666-1670.

5. Bondarev A.V., Bataronov I.L., Ozherel’ev V.V., Barmin Yu.V. “Statistical-geometry analysis of atomic structure of Re-Gd amorphous alloys”, *Proc. of XII International Seminar “Physical and Mathematical Modelling of Systems” (Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye sistem: materialy XII Mezhdunar. seminara)*, Voronezh, 2015, part 3, pp. 20-24.

6. Bondarev A.V., Barmin Yu.V., Bataronov I.L., Ozherelyev V.V., Urazov D.V., Lebedinskaya E.V., Kordin O.A. “Application of percolation theory for analysis of atomic structure of rhenium-based amorphous alloys”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2006, vol. 2, no. 8, pp. 48-51.

Submitted 27.06.2018; revised 01.10.2018

Information about the authors

Aleksey V. Bondarev, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bondarev_a_v@mail.ru
Igor L. Bataronov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ibat@mail.ru
Irina M. Pashueva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vapushka@yandex.ru

УДК 533.924

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА КИНЕТИКУ ТРАВЛЕНИЯ $LiTaO_3$ ВО ФТОРСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАЗМЕ

И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов

Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в статье представлены данные, характеризующие влияние давления и температуры на кинетические особенности процесса травления полированных монокристаллических образцов $LiTaO_3$ во фторсодержащей плазме на основе газа SF_6. Эксперименты проводились на установке Corial D250 с реакционно-разрядной камерой диодного типа. Установлено, что в исследуемом диапазоне давлений наблюдается снижение скоростей травления с ростом данного технологического параметра. При возрастании давления происходит увеличение концентрации частиц, что приводит к потерям энергии электронами вследствие уменьшения длины свободного пробега из-за увеличения частоты соударений. Как следствие, снижается скорость диссоциации SF_6, которая существенным образом влияет на концентрацию радикалов фтора, участвующих в процессе плазмохимического травления. Зависимости $V_{тр}=f(P)$ имеют качественно подобный вид нисходящей кривой при различных значениях приложенной мощности. Процесс травления является пороговым и начинается при температуре 450÷500 К, которая, по-видимому, связана с летучестью продуктов реакции. Изменение температуры в диапазоне от 500 до 570 К приводит к экспоненциальному росту скорости травления. Для данного интервала рабочих температур была рассчитана эффективная энергия активации, значение которой E_a=100 кДж/моль. Дальнейшее увеличение температуры, приводит к смене области протекания процесса с кинетической на диффузионную, что, в свою очередь, характеризуется снижением эффективной энергии активации до значения 8 кДж/моль

Ключевые слова: плазмохимия, танталат лития, радикалы фтора, температурная стимуляция, энергия активации

Введение

Закономерности протекания процессов при плазмохимическом травлении являются предметом пристального изучения, поскольку именно знание физико-химических механизмов позволяет успешно подбирать режимы для получения необходимых результатов. Особенно важны вопросы, связанные с кинетикой химических реакций, которая изучает скорости протекания химических превращений и факторы, влияющие на эту скорость.

Скорость химической реакции зависит от многих факторов, и в первую очередь среди них следует принимать во внимание природу реагирующих веществ, их концентрацию, а также совокупность внешних факторов, таких как мощность, давление, температура, наличие катализаторов или ингибиторов.

Природа реагирующих веществ проявляется не только в качественном и количественном составе вещества, но и в его кристаллохимическом строении, характере химической связи и др. Важным фактором также является состояние поверхности, от которой напрямую зависит скорость химических реакций, поскольку дефекты поверхности, инородные атомы и их кластеры способствуют изменению энергии активации и, как следствие, скорости взаимодействия [1].

Внешние технологические факторы представляют собой гибкие инструменты управления процессом плазмохимического травления.

Целью данной статьи является анализ кинетических особенностей процесса травления танталата лития во фторсодержащей плазме в зависимости от давления и температуры, а также расчет эффективной энергии активации на основании экспериментальных данных.

Методика эксперимента и оборудование

Исследовалась кинетика травления танталата лития во фторсодержащей плазме в зависимости от давления в реакционно-разрядной камере и температуры. В качестве объектов использовались полированные монокристаллические образцы $LiTaO_3$ Y-среза размером 1×1 $см^2$.

Перед травлением образцы подвергались циклу отмывки в смеси КАРО (H_2O_2:H_2SO_4 =3:7) в течение 7 минут при T=130°C для удаления органических загрязнений, затем промывались в деионизованной воде. После чего отмывались в RCA1 (H_2O_2:NH_4OH:H_2O=1:1:5) в течение 5 минут при T=75°C с последующей отмывкой в деионизованой воде.

© Коняев И.В., Владимирова Л.Н., Бормонтов Е.Н., 2018

Эксперименты по плазменной обработке проводились на установке Corial D 250 (Corial Company, Франция), оборудованной изотермическим плазменным реактором диодного типа с контролем температуры ±1°С, которая обеспечивает возможность создания высокоплотной плазмы газового разряда при пониженном давлении. Схематическое устройство, характеристики плазменной системы, а также методика определения скорости травления более подробно изложены в [2]. В качестве плазмообразующего газа использовался гексафторид серы (SF_6).

Влияние давления на кинетику травления $LiTaO_3$

Важным технологическим параметром, в значительной степени влияющим на характеристики плазмы и скорости физико-химических процессов в ней, является давление газа в реакционно-разрядном пространстве.

Для выяснения характера изменения концентрации электронов в зависимости от давления в разрядной камере следует проанализировать их движение в электромагнитном поле при различных давлениях. При понижении давления длина свободного пробега увеличивается из-за уменьшения общей концентрации частиц и, следовательно, электроны могут на длине свободного пробега набрать большую энергию, что приводит к повышению доли высокоэнергетичных электронов. Это в свою очередь приводит к увеличению скоростей диссоциации и ионизации плазмообразующего газа. Как следствие, в результате действия механизмов, подробно описанных в [3], происходит рост концентрации радикалов фтора, которые являются основным компонентом, участвующим в процессе плазмохимического травления. Однако дальнейшее снижение давления вызывает увеличение скорости гибели электронов за счет возрастания диффузионных потерь, компенсировать которые при имеющейся напряженности поля уже невозможно.

При высоких давлениях диффузионные потери начинают играть меньшую роль, поскольку происходит увеличение концентрации частиц, но в данном случае на первый план начинают выступать процессы потерь энергии электронов вследствие их соударений с атомами или молекулами плазмообразующего газа за счет уменьшения длины свободного пробега (увеличения частоты столкновений). Потери энергии при соударениях ограничивают частоту ионизации, то есть электрон не может приобрести энергию, которая превышает предел, определяемый существованием данных потерь.

Таким образом, изменение давления в разрядной камере может приводить как к возрастанию, так и снижению концентрации электронов в плазме, причем соответственно будут меняться и коэффициенты скоростей процессов.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные влияния давления на скорость плазмохимического травления танталата лития в плазме газа SF_6.

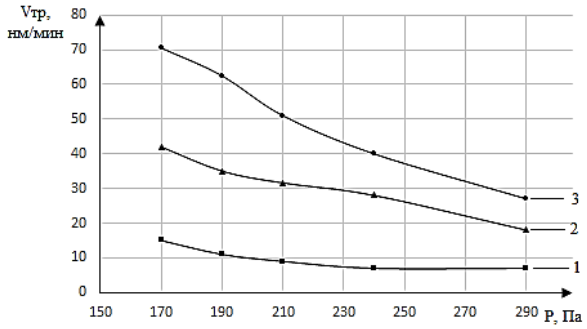


Рис. 1. Влияние давления в камере на скорость травления $LiTaO_3$ в плазме SF_6:
1 - W=100 Вт, T=550 K, t=20 мин.
2 - W=200 Вт, T=550 K, t=20 мин.
3 - W=250 Вт, T=550 K, t=20 мин.

Используемая в экспериментах плазмохимическая установка не позволяет добиться устойчивых рабочих давлений ниже 170 Па, в связи с чем наблюдается лишь нисходящая часть кинетической кривой, отвечающая за снижение скорости вследствие уменьшения длины свободного пробега.

Температурная стимуляция процесса травления $LiTaO_3$

На рис. 2 представлены зависимости скоростей плазменного травления танталата лития от температуры при различных мощностях. Изменение температуры происходило в результате нагрева образцов, размещенных на нагревательном столе. Процесс травления сопровождался образованием твердых (LiF) и газообразных (TaF_5, TaF_3, O_2, TaO_2F и др.) продуктов. Причем

из характера зависимостей $V_{тр}=f(T)$, представленных на рис. 2, видно, что реакция начинала протекать после достижения пороговой температуры ($T_{пор.}$). Для данного процесса травления она находилась в диапазоне 450÷500 К. На основании полученных данных можно судить о том, что основной проблемой проведения процессов плазмохимического травления $LiTaO_3$ в плазме SF_6, по-видимому, является низкая летучесть продуктов реакции, определяющая величину пороговой температуры. Фторид лития имеет температуру кипения 1949 К (при нормальных условиях) и формирует на поверхности маскирующий слой, снижающий скорость травления. При этом стоит отметить зависимость пороговой температуры от режимов обработки. Так при более высокой мощности, по-видимому, происходит дополнительный косвенный нагрев образца из-за влияния ионной составляющей плазмы, что сказывается в некотором снижении пороговой температуры, ввиду особенностей, связанных с измерением температуры на обратной стороне столика, не контактирующей с плазмой.

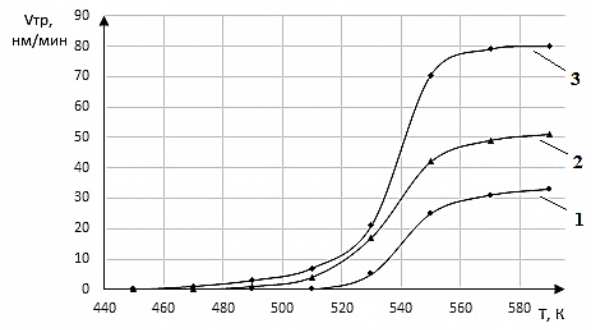


Рис. 2. Влияние температуры на кинетику травления $LiTaO_3$ в плазме SF_6:
1 - W=100 Вт, P=170 Па, t=20 мин.
2 - W=200 Вт, P=170 Па, t=20 мин.
3 - W=250 Вт, P=170 Па, t=20 мин.

С ростом температуры наблюдается экспоненциальное увеличение скорости травления в диапазоне от 500 до 570 К. Наиболее вероятной причиной наблюдаемой зависимости может быть изменение баланса между скоростями адсорбции химических реагентов и десорбции продуктов реакции травления, а также увеличение скорости химической реакции по мере роста температуры. Дальнейшее повышение температуры (T>570 K) приводит к отклонению кинетики травления от экспоненциального закона, что можно объяснить сменой области протекания процесса с кинетической на диффузионную. При этом лимитирующими стадиями становятся, по-видимому, не адсорбционно-десорбционные процессы и скорость химических реакций, а диффузионные перемещения химически активных частиц.

От состояния поверхности зависит скорость химического превращения, поскольку дефекты поверхности, инородные атомы и их кластеры способствуют изменению энергии активации и, как следствие, скорости взаимодействия [4].

Определение энергии активации гетерогенных процессов является сложной задачей, поскольку она зависит от целого ряда факторов, и в первую очередь в значительной степени – от температуры.

Энергия активации относится к фундаментальным характеристикам любого процесса. При анализе кинетики твердофазных реакций используют экспериментально найденную зависимость $\ln v = f\left(\frac{1}{T}\right)$ или статистическую модель, тогда $v = k_0 e^{-E_a/RT}$, где k_0 - общее число возможных мест осуществления элементарных актов.

В.А. Архаров [5] обратил внимание на то, что для твердофазных реакций физический смысл E_a и k_0 неоднозначен. В элементарном акте реакций данного типа участвует неопределенно большое число частиц, причем степень их участия зависит от сил межатомного взаимодействия, типа решетки и степени ее совершенства. Вследствие этого в твердых телах молекулярный состав комплекса частиц, участвующих в элементарном акте, неопределенен, что делает условным и расчеты E_a.

Различные части реального кристалла из-за наличия точечных и протяженных дефектов неравноценны. В результате энергия активации элементарного акта неодинакова на различных участках кристалла, поэтому ее называют эффективной энергией активации. Для неискаженного участка энергия активации максимальна $(U_a)_0$, а для искаженного она равна $U_a = (U_a)_0 - \Delta U$, где значение ΔU меняется от максимального до нуля (у неискаженных участков).

Таким образом, усредненная по площади поверхности эффективная энергия активации показывает, как качественно скорость исследуемого твердофазного процесса реагирует на изменение температуры, характеризуя степень затрудненности

элементарных актов и всего процесса, являющегося суммой таких актов.

Отклонение температурной зависимости скорости реакции от линейного закона (в полулогарифмических координатах) говорит о переходе процесса в диффузионную область. При этом суммарная скорость лимитируется скоростью диффузии химически активных частиц к поверхности. На протекание реакции в этой области указывают низкие значения эффективной энергии активации, так как константа скорости диффузии очень слабо зависит от температуры. Наблюдаемые закономерности процессов, протекающих в диффузионной области, не связаны с механизмами и кинетическими параметрами собственно химических реакций. Поэтому для их установления необходимо, снижая температуру, обеспечить переход процесса в кинетическую область [6-7].

На рис. 3 представлены зависимости $V_{тр}(10^3/T)$, из которых определена эффективная энергия активации реакции. Исходя из формулы, было показано, что при температурах 500 ÷ 570 К эта энергия составила величину порядка 100 кДж/моль для использованных в эксперименте режимов обработки:

$$E_a = R\frac{\ln V_2 - \ln V_1}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}},$$

где R=8,314459 Дж/(моль·К).

При увеличении температуры образца T>570 К значение эффективной энергии активации довольно резко снижалось до 8 кДж/моль. Такое уменьшение энергии активации плазмохимического травления $LiTaO_3$ свидетельствует о том, что при высоких температурах этот процесс уже не описывается уравнением Аррениуса.

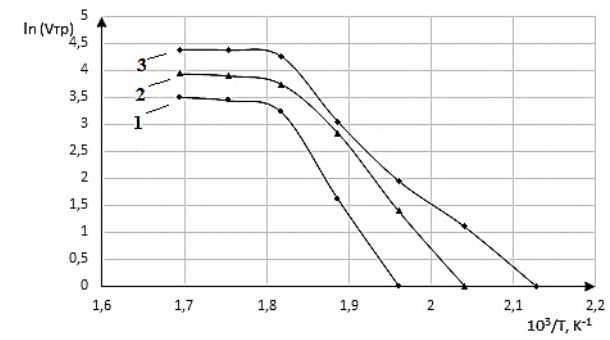


Рис. 3. Зависимость скорости травления $LiTaO_3$ от температуры в полулогарифмических координатах
1 - W=100 Вт, P=170 Па, t=20 мин.
2 - W=200 Вт, P=170 Па, t=20 мин.
3 - W=250 Вт, P=170 Па, t=20 мин.

Заключение

В статье проанализировано влияние давления в реакционно-разрядной камере и температуры на кинетику травления танталата лития во фторсодержащей плазме на основе гексафторида серы.

В исследуемом диапазоне наблюдалось снижение скорости травления при увеличении давления. Данный факт связан прежде всего с уменьшением длины свободного пробега и потерями энергии за счет частых соударений, что в свою очередь влияет на степень ионизации и диссоциации молекул SF_6 и, как следствие, на концентрацию радикалов фтора, являющихся основной компонентой плазмохимического травления. При этом также установлено, что зависимости $V_{тр}=f(P)$ имеют качественно подобный вид для различных значений прикладываемой мощности.

При исследовании температурной зависимости установлено наличие пороговой температуры $T_{пор}$=450÷500 К. В диапазоне от 500 до 570 К наблюдается экспоненциальная зависимость влияния температуры на кинетику травления $LiTaO_3$. По экспериментальным данным рассчитана эффективная энергия активации, значение которой составило E_a=100 кДж/моль.

Литература

1. Панченков Г.М., Лебедев В.П. Химическая кинетика и катализ: учеб. пособие для вузов. 3-е изд. испр. и доп. М.: Химия, 1985. 592 с.

2. Особенности кинетики травления ниобата и танталата лития во фторсодержащей плазме / И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.А. Буслов, Е.А. Сизаск // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 123-127.

3. Влияние газовых добавок Ar, N_2 и N_2O на кинетику травления танталата лития во фторсодержащей плазме / И.В. Коняев, Л.Н. Владимирова, Е.Н. Бормонтов, В.А. Буслов, И.И. Бородкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 150-155.

4. Розовский А.Я. Кинетика топохимических реакций. М.: Химия, 1974. 224 с.

5. Архаров В.И. Об уточнении понятий «энергия активации» и «элементарный акт» для твердого состояния вещества // Журн. техн. физики. 1954. Т. 24. № 3. С. 375-387.

6. Андреев Г.Г., Дьяченко А.Н., Пермяков О.Е. Курс лекций по химической гетерогенной кинетике: учеб. пособие. Томск: Изд. ТПУ, 2008. 120 с.

7. Миттова И.Я., Лаврушина С.С., Кострюков В.Ф. Кинетика гетерогенных реакций: учеб. пособие. Воронеж: Изд. ВГУ, 2005. 39 с.

Поступила 15.06.2018; принята к публикации 14.09.2018

Информация об авторах

Коняев Иван Васильевич – аспирант, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: www.450_asd@mail.ru, тел. 89102417276
Владимирова Людмила Николаевна – канд. хим. наук, доцент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: lnvlad@mail.ru, тел. 89204638013
Бормонтов Евгений Николаевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: me144@phys.vsu.ru, тел. 89155817522

INFLUENCE OF PRESSURE AND TEMPERATURE ON THE KINETICS OF ETCHING OF LITHIUM TANTALATE IN FLUORINATED PLASMA

I.V. Konyaev, L.N. Vladimirova, E.N. Bormontov

Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract: the data stared in the article show the influence of pressure and temperature on the kinetic features of the etching process of polished single-crystal $LiTaO_3$ samples in a fluorine-containing plasma based on SF_6 gas. The experiments were performed on a Corial D250 with a diode-type reaction chamber. It was established that decrease in etching rates with increasing pressure was observed in the investigated range. The growth in particle concentration occurs with increasing pressure that leads to energy loss of electrons because of decrease in the mean free path (increase in collision frequency). As a result, the rate of dissociation decreased. This has a significant impact on concentration of fluorine radicals involved in the process of plasma chemical etching. Dependencies V_{et}=f(P) have qualitatively similar type of down warding curve at different power values. The etching process is threshold and starts at range of temperature 450÷500 K apparently related to volatility of reaction products. Temperature changes in range from 500 to 570 K lead to exponential growth of the etching rates. The effective activation energy for the range of working temperatures was calculated. Its value was about 100 kJ/mol. Further increase in temperature seems to change the area of passing process from kinetic to diffusion, that can be depicted by decrease of effective activation energy to 8 kJ/mol

Key words: plasma chemistry, lithium tantalite, fluorine radicals, temperature stimulation, activation energy

References

1. Panchenkov G.M., Lebedev V.P. “Chemical kinetics and catalysis: manual” (“Khimicheskaya kinetika i kataliz: Ucheb. posobie dlya vuzov”), Moscow, Khimiya, 1985, 592 p.
2. Konyaev I.V., Vladimirova L.N., Bormontov E.N., Buslov V.A., Sizask E.A. “Features of the etching kinetics of lithium niobate and tantalate in fluorine-containing plasma” *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta),* 2017, vol. 13, no. 3, pp. 123-127.
3. Konyaev I.V., Vladimirova L.N., Bormontov E.N., Buslov V.A., Borodkin I.I. “Effect of Ar, N2 and N2O gas additives on the etching kinetics of lithium tantalate in fluorine-containing plasma”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta),* 2018, vol. 14, no. 3, pp. 150-155.
4. Rozovskiy A.Ya. “Kinetics of topochemical reactions” (“Kinetika topokhimicheskih reaktsiy”), Moscow, Khimiya, 1974, 224 p.
5. Arkharov V.I. “On clarifying the concepts of "activation energy" and "elementary act" for the solid state of matter”, *Journal of Technical Physics (Zhurn. of tekhn. fiziki)*, 1954, vol. 24, no. 3, pp. 375-387.
6. Andreev G.G., D’yachenko A.N., Permyakov O.E. “A course of lectures on chemical heterogeneous kinetics: manual” (“Kurs lektsiy po khimicheskoy geterogennoy kinetike: Ucheb. Posobie”), Tomsk, TPU, 2008, 120 p.
7. Mittova I.Ya., Lavrushina S.S., Kostryukov V.F. “Kinetics of heterogeneous reactions: manual” (“Kinetika geterogennykh reaktsii: Ucheb. Posobie”), Voronezh, VSU, 2005, 39 p.

Sabmitted 15.06.2018; revised 14.09.2018

Information about the authors

Ivan V. Konyaev, Graduate student, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: www.450_asd@mail.ru, tel. 89102417276
Lyudmila N. Vladimirova, Cand. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: lnvlad@mail.ru, tel. 89204638013
Evgeniy N. Bormontov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: me144@phys.vsu.ru, tel. 89155817522

УДК 669.13.018

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВА НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ИЗНОСОСТОЙКИХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Л.С. Печенкина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: объектом исследования являются комплексно-легированные твердые сплавы, в том числе белые чугуны, использующиеся для износостойких деталей, которые уже в литье должны обладать требуемыми прочностью и ударной вязкостью. Задачей исследования является выявление химического состава, параметров структурообразования, которые влияют на ударную вязкость. В процессе исследования были выплавлены сплавы, содержащие в %, от 1,18 до 2,49 C, от 0,7 до 5,5 Mn, от 3,1 до 9,6 Cr, от 1,8 до 8,3 V, до 1,3 Si. Исследуемые сплавы распределили по проценту аустенита, содержащемуся в их структуре, на три группы. Первая группа характеризовалась повышением твердости при одновременном повышении процента аустенита в структуре до 13. Вторая содержала до 25 процентов аустенита без увеличения твердости, и в третьей наблюдалось уменьшение твердости при большем количестве аустенита (более 30 %). Отдельную группу составили сплавы, содержащие до 2,14 % меди, до 1,73 % молибдена. Оценка изменения ударной вязкости проведена по влиянию факторов химического (углерод, марганец, хром и ванадий) и фазового состава методами многофакторного регрессионного анализа. Определено, что карбидные фазы (MC, M_7C_3) в исследуемых сплавах снижают ударную вязкость; особенно заметно это в сплавах группы 1 и 3, значительно слабее проявляется их влияние в сплавах группы 2. Установлено, что снижение ударной вязкости происходит при максимальной степени мартенситного превращения в структуре (при 2-2,2% Mn или 20-25% А); повышается она при более высокой степени аустенитизации структуры (более 40% А); у отдельной группы комплексно-легированных сплавов этот эффект не проявляется в связи с отличительными особенностями их структуры; наилучшее сочетание механических свойств у сплавов этой группы обеспечивается при 20-40% аустенита в их структуре

Ключевые слова: ударная вязкость, белый чугун, структура, легирующий элемент

Введение

Стойкость металла к изнашиванию представляет собой комплексный относительный показатель, характеризующий способность металла противодействовать его взаимосвязи с другими материалами, осуществляемому в условиях определенных нагрузок, температур, влияния внешней среды.

Абразивное изнашивание деталей осуществляется путем действия твердых элементов на поверхность. По механизму абразивное изнашивание подобно процессам микрорезания деталей. Частицы абразива, внедряясь в поверхность, царапают металл, таким образом воздействуют микроскопические резцы. Действие абразивных частиц проходит в условиях маленьких давлений и скоростей, что отличается от резания, поэтому металл может быть мене теплостоек. Высокие показатели твердости и вязкости требуются от металлов в случае абразивного изнашивания. Карбидную фазу и матричную основу металла выбирают, исходя из эксплуатационных характеристик детали, так как они обеспечивают необходимую твердость. В случае абразивного изнашивания при небольшом давлении наилучшую стойкость к изнашиванию проявляют твердые сплавы, имеющие наименьшую часть матричной фазы и высокотвердый белый чугун с наибольшим содержанием карбидов с матрицей на основе мартенсита. С повышением удельных нагрузок и особенно при наличии динамического характера нагрузки соотношение карбидов и матрицы, а также вида матрицы должно меняться [1]. Когда увеличивается нагружение, металлическая основа должна обладать необходимой вязкостью, не допуская, чтобы карбиды выкрашивались. Карбиды же должны образовывать общий каркас. Таким образом, литые сплавы более стойкие к изнашиванию в отличие от деформированных. Именно поэтому в качестве объекта исследования для отливок, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания были выбраны белые комплексно-легированные чугуны [2]. Поскольку главным из большого числа вопросов в машиностроении считается увеличение периода долговечности механизмов, тема данной статьи является актуальной. Одним из перспективных направлений в этом плане, несмотря на обилие литературных данных, является изучение влияния легирующих элементов и условий формирования структуры на свойства литого металла.

© Печенкина Л.С., 2018

Стабильность структур и фаз определяет стойкость к изнашиванию. Как установлено из обзора литературы, повышенную стойкость к износу проявляют структуры стабильные и метастабильные, при эксплуатации которых происходит превращение, приводящее за счет деформационного старения к упрочнению металла [3, 4]. Износостойкие сплавы типа чугунов с аустенитной структурой производят с помощью легирования марганцем, когда его больше пяти процентов. Можно в их состав добавить до пяти процентов хрома, не более полутора процентов меди, по половины процента никеля, вольфрама или молибдена. Эти чугуны имеют твердость НВ 500 (ниже, чем могла бы быть при другом составе), а ударную вязкость высокую (в отличие от чугунов с мартенситной структурой). Поэтому их рекомендуется использовать, когда присутствует ударно-абразивный износ.

Научная новизна работы заключается в определении влияния количества и типа карбидов на ударную вязкость в малоуглеродистых комплексно-легированных чугунах.

Целью работы являлся анализ влияния химического и фазового состава белого чугуна на ударную вязкость для обеспечения необходимых эксплуатационных свойств в литых деталях, подвергающихся интенсивному абразивному изнашиванию при повышенных ударных нагрузках.

Методика проведения эксперимента

Чугун выплавлялся в индукционной тигельной печи емкостью 160 кг, футерованной основными огнеупорами.

Для проведения микроструктурного анализа использовали сухие разовые песчаные формы при отливке образцов. Часть образцов для более достоверного анализа вырезалась из литых деталей. При проведении карбидного и рентгено-спектрального анализа выявляли химический состав двух карбидов ванадия VC и хрома M_7C_3. Это требовалось в случае определения морфологии структуры.

Копёр типа 2130 КМ-0,3 использовали для определения ударной вязкости по стандартной методике. Размер поперечного сечения плоских образцов, подвергнутых шлифованию, составил 10×5 мм. Установлены величины ударной вязкости при литье для всех составов. Так как получено в каждом составе несколько значений, последующий анализ сделан при учёте средних значений ударной вязкости.

Проведение исследования

При проведении эксперимента получены сплавы, содержащие в % от 1,18 до 2,49 C, от 0,7 до 5,5 Mn, от 3,1 до 9,6 Cr, от 1,8-8,3 V, до 1,24 Si.

Для анализа результатов эксперимента сплавы разбили на три группы [5]. Отдельную группу составили комплексно-легированные сплавы от М1 до М7. Значения ударной вязкости показаны в табл. 1, 2.

Первая группа характеризуется повышением твердости при одновременном повышении процента аустенита в структуре до 13. Вторая содержит до 25 процентов аустенита, и увеличения твердости не наблюдается; в третьей наблюдается уменьшение твердости при большем количестве аустенита (30 % и более).

В случае сплавов от 1 до 25 для анализа динамики ударной вязкости использовались показатели химического и фазового состава. При анализе сплавов от М1 до М7 учитывались только показатели фазового состава.

При проведении многофакторного регрессионного анализа были получены уравнения первой степени, представленные ниже:

для группы 1

$$КС = 70,9 – 19 \cdot C – 10,4 \cdot Mn – 1,35 \cdot Cr - 5,48 \cdot \Delta V; \quad (1)$$

$$КС = 58,3 – 1,64 \cdot A – 2,53 \cdot МС - 5,21 \cdot M_7C_3; \quad (2)$$

для группы 2

$$КС = 75 – 20,6 \cdot C – 6,67 \cdot Mn – 1,17 \cdot Cr - 0,19 \cdot \Delta V; \quad (3)$$

$$КС = 40,7 - 1,49 \cdot A + 0,03 \cdot МС + 0,03 \cdot M_7C_3. \quad (4)$$

для группы 3

$$КС = 60,5 – 23,6 \cdot C + 2,2 \cdot Mn – 0,32 \cdot Cr - 2,7 \cdot \Delta V; \quad (5)$$

$$КС = 59,4 + 0,065 \cdot A - 4,1 (МС + M_7C_3); \quad (6)$$

для группы М1 – М7

$$КС = 20,1 – 0,17 \cdot A + 1,0 \cdot МС - 0,5 \cdot M_7C_3. \quad (7)$$

Таблица 1

Экспериментальные данные по ударной вязкости сплавов (средние значения)

Группы сплавов							
1 группа		2 группа		3 группа		М1 – М7	
номер сплава	КС, Дж/см^2	номер сплава	КС, Дж/см^2	номер сплава	КС, Дж/см^2	номер сплава	КС, Дж/см^2
1	25	2	25	3	34	М1	22
7	20	4	26	9	28	М2	22
11	15	5	22	16	10	М3	21
12	12	6	20	20	12	М4	21
15	8	8	20	22	10	М5	21,5
24	6	10	20	25	12	М6	16
-	-	13	16	-	-	М7	13,5
-	-	14	12	-	-	-	-
-	-	17	10	-	-	-	
-	-	18	6	-	-	-	-
-	-	21	5	-	-	-	-

Таблица 2

Характеристика комплексно-легированных сплавов М1-М7

Номер сплава	Содержание, % мас.				Содержание в структуре, %			Примечание
	C	Mn	Cr	ΔV	A	MC	M_7C_3	
М1	1,42	2,19	4,4	+ 2,1	10,0	3,8	5,0	0,2 % структурно-свободной медистой фазы
М2	1,54	3,11	6,0	+ 1,7	20,2	5,0	3,9	0,8 % структурно-свободной медистой фазы
М3	1,88	1,96	7,4	+ 1,2	21,9	7,0	3,6	-
М4	2,01	1,84	6,6	+ 1,2	19,9	7,9	3,2	-
М5	2,33	4,05	8,5	+ 0,9	57,8	9,8	2,9	-
М6	1,18	0,93	3,1	+ 2,4	6,0	2,3	5,5	1,1 % структурно-свободной медистой фазы
М7	2,49	5,14	9,6	+0,5	86,8	11,0	2,2	-

Рис. 1 показывает зависимости влияния углерода, марганца, хрома и ванадия на ударную вязкость. При построении графиков количество остальных химических элементов фиксировалось на основном уровне.

При увеличении углерода уменьшение ударной вязкости у всех сплавов происходит примерно одинаково. Это объясняется формированием сетчатой структуры.

Обнаружен сложный характер влияния марганца. При его повышении в сплавах первых двух групп очень снижается ударная вязкость. Это происходит при увеличении мартенситной структуры, которая обусловливает внутренние напряжения.

У сплавов третьей группы марганец повышает ударную вязкость, что связано с увеличением степени аустенитизации структуры.

Но линейная аппроксимация не может полностью характеризовать влияния марганца и степени аустенитизации структуры. Это будет представлено далее, когда будет учитываться влияние структурных факторов.

Содержание хрома от пяти до восьми процентов оказывает незначительное влияние на ударную вязкость. Так, у сплавов первых двух групп немного уменьшает, а в комплексно-легированных сплавах практически не влияет.

Нехватка ванадия (ΔV) плохо отражается на значении ударной вязкости. Весьма заметно это при снижении ударной вязкости в сплавах первой и третьей групп. В случае второй группы влияния дефицита ванадия до полутора процентов практически нет. У сплавов данной группы влияние карбидной фазы (т.е. дефицита ванадия) не существенно по сравнению с влиянием матрицы сплавов.

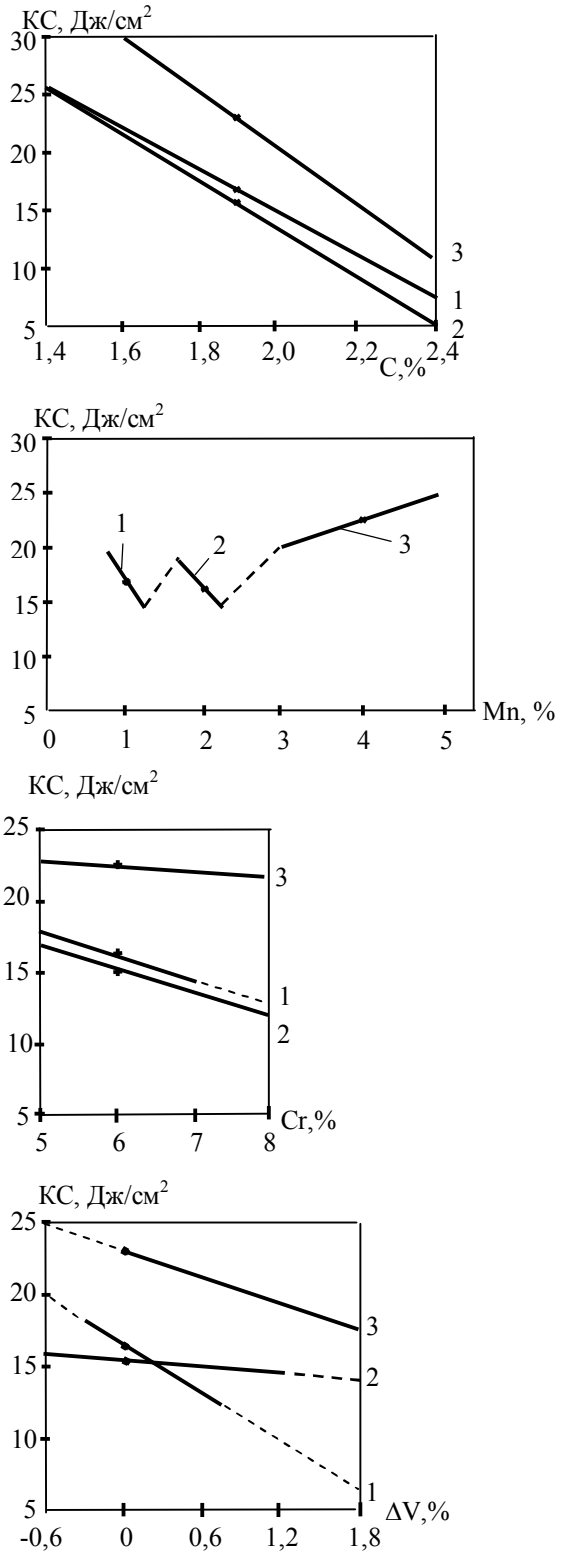


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости от химического состава сплавов от 1 до 25: 1, 2 и 3 группы

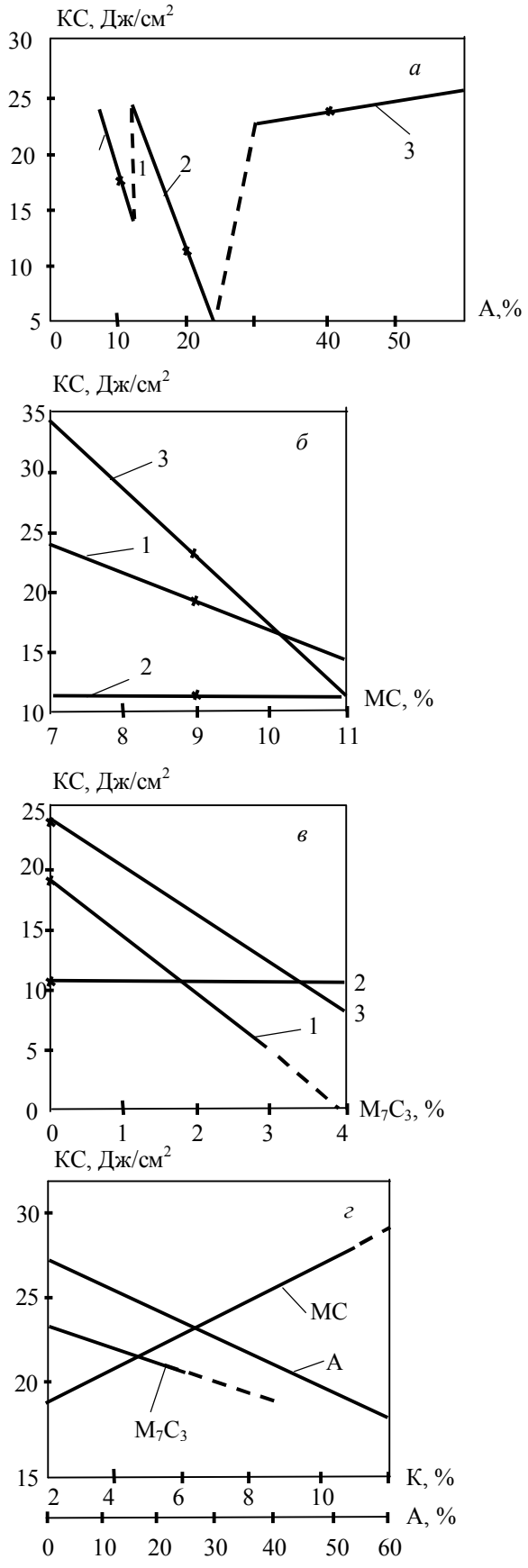


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости от параметров фазового состава сплавов от 1 до 25 (*а, б* и *в*) и комплексно-легированных сплавов (*г*); группы 1, 2 и 3

Рис. 2 характеризует зависимость ударной вязкости от параметров фазового состава сплавов. Характер влияние степени аустенитизации структуры похож на представленную ранее зависимость от количества марганца. Оба графика имеют сложный вид, особенно в области состыковки зависимостей для различных групп металлов. Очевидно, что общая зависимость не является линейной, но уже на графике в таком упрощенном изображении видна важная характерная особенность зависимости – большое уменьшение ударной вязкости при количестве аустенита А от 20 до 25 процентов или от 2 до 2,2 процентов марганца, что характеризует наибольшую степень мартенситного превращения в сплавах. Указанная особенность заметно проявляется, если анализировать результаты эксперимента по двум группам сплавов «*а*» и «*б*», которые выделены для этого специально. Обработка результатов с помощью методов статистики показана на рис. 3. В случае такого распределения в группу «*а*» попали сплавы первой и второй группы, которые имеют до двадцати пяти процентов аустенита в структуре. В группе «*б*» находятся сплавы с содержанием более двадцати трех процентов аустенита. Это третья группа сплавов и некоторые из второй группы.

Состыковка обеих групп наблюдается в случае двадцати - двадцати пяти процентов аустенита.

Уравнения зависимостей, представленных на рис. 3, могут быть записаны в следующем виде:

сплавы группы «*а*»

$$КС = 32,4 – 2,08 \cdot А + 0,104 \cdot А^2 - 0,00265 \cdot А^3; \quad (8)$$

сплавы группы «*б*» (кроме сплав три)

$$КС = - 0,4 + 0,40 \cdot А + 0,104 \cdot А^2 - 0,0030 \cdot А^3. \quad (9)$$

Несмотря на то, что в группе «*а*» сплавов наблюдается немалый разброс данных, а значит, модель не может быть адекватной, можно говорить о большом уменьшении ударной вязкости в случае двадцати двух – двадцати пяти процентов аустенита в структуре, что определяется наибольшей степенью мартенситного превращения и самой большой твердостью в этих сплавах. В случае повышения степени аустенитизации более двадцати пяти процентов происходит уменьшение мартенсита в структуре, ударная вязкость увеличивается (в группе «*б*» сплавов).

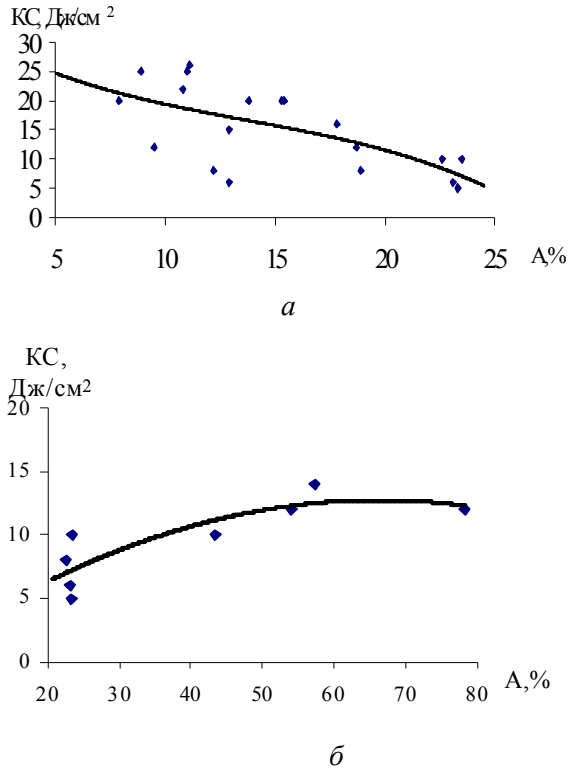


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости от степени аустенитизации структуры для сплавов от 1 до 25 (группы "*а*" и "*б*")

Фазы двух карбидов (ванадия VC и хрома M_7C_3) уменьшают ударную вязкость в экспериментируемых сплавах, что хорошо наблюдается в сплавах первой и третьей группы, но намного меньше в сплавах второй группы.

Рис. 2 показывает также графики для комплексно-легированных сплавов от М1 до М7 («*г*»), которые имеют вид зависимости (7). Карбидные фазы типа M_7C_3 и в данном случае немного уменьшают ударную вязкость, но за счет равномерно расположенных в композиционной структуре карбидов МС происходит увеличение ударной вязкости. Частично последнее утверждение поясняется и тем, что при росте числа эвтектических карбидов типа МС снижается склонность аустенита к дисперсионному упрочнению. Неадекватность модели первого порядка наблюдается в оценке влияния количества аустенита. Действительно, при статистическом анализе данных с помощью зависимости второго порядка видим, что это выражение носит экстремальный характер:

$$КС = 16{,}2 + 0{,}348 \cdot A - 0{,}0044 \cdot A^2. \qquad (10)$$

Эта зависимость показана на рис. 4.

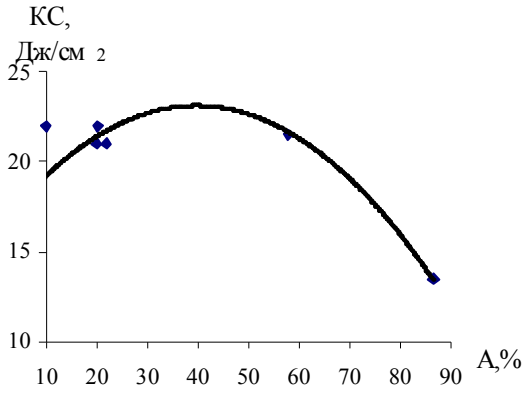


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости от степени аустенитизации структуры для комплексно-легированных сплавов от М1 до М7

Представленная зависимость показывает соответствие наибольшей ударной вязкости при структуре, содержащей от сорока до сорока пяти процентов аустенита. Это характеризует примерно полумартенситную структуру матрицы (половина мартенсита и половина аустенита), в случае композиционного расположения структурных составляющих (аустенит представляет основу, включения мартенсита и карбидов являются упрочнителями). Когда преобладают структуры аустенита, в большой степени наблюдается явление дисперсионного упрочнения аустенита при уменьшении ударной вязкости.

Заключение

В характере зависимости ударной вязкости белых чугунов от количества химических элементов и состава фаз выявлены две следующие закономерности:

1) в сплавах первых трех групп происходит уменьшение механических свойств (прочности и ударной вязкости) в случае наличия максимума мартенситного превращения, что соответствует примерно двум процентам Mn или двадцати – двадцати пяти процентам А; мехсвойства таких сплавов увеличиваются в случае повышенной степени аустенитизации (не менее сорока процентов А);

2) в комплексно-легированных сплавах от М1 до М7 этот эффект не проявляется в связи со значительной измельченностью их микроструктуры, отсутствием сетчатых структур, присутствием дополнительных демпфирующих фаз; самое оптимальное сочетание мехсвойств в сплавах этой группы наблюдается в случае содержания в структуре двадцати – сорока процентов аустенита.

Литература

1. Печенкина Л.С. Влияние химического состава на микроструктуру и фазовый состав малоуглеродистых белых чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 2. С. 12-16.

2. Печенкина Л.С., Сильман Г.И., Рукавицына А.А. Влияние хрома и ванадия на композиционную структуру в малоуглеродистых белых чугунах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 13-17.

3. Колокольцев В.М. Структура и свойства белых чугунов разных систем легирования // Вестник Магнитогорского технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 19-23.

4. Нетребко В.В. Особенности легирования белых износостойких чугунов // Литье и металлургия. 2015. № 2. С. 37-41.

5. Печенкина Л.С. Влияние содержания структурообразующих компонентов на твердость малоуглеродистых белых чугунов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 134-138.

Поступила 15.06.2018; принята к публикации 14.09.2018

Информация об авторах

Печенкина Лариса Степановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pls-7@mail.ru

INFLUENCE OF CHEMICAL AND PHASE COMPOSITION ON SHOCK VISCOSITY ON WEAR-RESISTANT WHITE CAST IRON

L.S. Pechenkina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the object of the study is complex-alloyed solid alloys, including white cast iron, used for wear-resistant parts, which already in casting should have the required strength and toughness. The task of the study is to identify the chemical composition, the parameters of the structure formation, which affect the toughness. In the process of investigation, we got the alloys containing such percent of the elements: from 1.18 to 2.49 C, from 0.7 to 5.5 Mn, from 3.1 to 9.6 Cr, from 1.8 to 8.3 V, up to 1.3 Si. The investigated alloys were divided into three groups according to the percentage of austenite contained in their structure. The first group was characterized by an increase in hardness with a simultaneous increase in the percentage of austenite in the structure up to 13. The second contained up to 25 percent of austenite without increasing the hardness, and the third showed a decrease in hardness with larger quantity of austenite (more than 30%). A separate group consisted of alloys containing up to 2.14% of copper, up to 1.73% of molybdenum. An assessment of the change in impact strength is based on the influence of chemical factors (carbon, manganese, chromium and vanadium) and phase composition by multivariate regression analysis. It was determined that the carbide phases (MC, M_7C_3) in the investigated alloys reduce the toughness. This is especially noticeable in the alloys of groups 1 and 3, their influence in the alloys of group 2 is much less pronounced. It was found that the decrease in the toughness occurs at the maximum degree of martensitic transformation in the structure (at 2-2.2% Mn or 20-25% A). It increases with a higher degree of austenitization of the structure (more than 40% A). For an individual group of complex-alloyed alloys this effect is not manifested in connection with the distinctive features of their structure. The best combination of mechanical properties for alloys of this group is provided at 20-40% of austenite in their structure

Key words: impact strength, white cast iron, structure, alloying element

References

1. Pechenkina L.S. “Effect of chemical composition on the microstructure and phase composition of low carbon white cast iron”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta),* 2016, vol. 12, no. 2, pp. 12-16.

2. Pechenkina L.S., Sil’man G.I., Rukavitsyna A.A. “Effect of chromium and vanadium on the composite structure in low-carbon white cast irons”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta),* 2015, vol.11, no. 6, pp.13-17.

3. Kolokoltsev V.M. “The structure and properties of white cast irons of different alloying systems”, *The Bulletin of G.I. Nosov Magnitogorsk Technical University (Vestnik Magnitogorskogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova)*, 2014, no. 1, pp. 19-23

4. Netrebko V.V. “Features of alloying of white wear-resistant cast irons”, *Casting and metallurgy (Lit'ye i metallurgiya)*, 2015, no. 2, pp. 37-41.

5. Pechenkina L.S. “Influence of the content of structure-forming components on the hardness of low-carbon white cast irons”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta),* 2017, vol.13, no. 3, pp.134-138.

Submitted 15.06.2018; revised 14.09.2018

Information about the author

Larisa S. Pechenkina, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: pls-7@mail.ru

УДК 53.091

ЭФФЕКТИВНАЯ УПРУГАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ ЧИСТОГО СОБСТВЕННОГО СЕГНЕТОЭЛАСТИКА $KH_3(SeO_3)_2$

С.А. Гриднев, И.И. Попов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: объектом исследования являлся монокристалл чистого собственного сегнетоэластика $KH_3(SeO_3)_2$, выращенный спонтанной кристаллизацией из пересыщенного водного раствора методом регулируемого снижения температуры. Решая задачу о кручении упругого анизотропного стержня с использованием измеренных значений модулей сдвига, можно рассчитать сдвиговые коэффициенты упругой жесткости кристалла. В результате для проведения экспериментов были выбраны образцы *Z*-ориентации монокристалла $KH_3(SeO_3)_2$, поскольку при такой ориентации образца одна из сдвиговых компонент σ_{55} крутильного механического напряжения сопряжена со сдвиговой компонентой спонтанной деформации x_{55}. При помощи установки на основе крутильного маятника получены петли механического гистерезиса $x(\sigma)$, свидетельствующие о нелинейном механическом поведении материала, связанном с переходом образца из полидоменного в монодоменное состояние. При различных температурах проведены измерения зависимостей упругой податливости от сдвигового механического напряжения. Обнаружено, что ниже температуры Кюри сдвиговая компонента упругой податливости s_{55} при изменении крутильного механического напряжения проходит через максимум, обусловленный динамикой сегнетоэластических доменных границ. Увеличение коэффициента эффективной упругой нелинейности с ростом температуры объясняется температурной зависимостью подвижности доменных стенок

Ключевые слова: сегнетоэластик, упругая податливость, механическая нелинейность диэлектрика, монокристалл $KH_3(SeO_3)_2$

Введение

Сегнетоэластиками называют кристаллические твердые тела, в которых в результате структурного фазового перехода в определенном интервале температур возникает спонтанная деформация, направление которой может быть изменено приложением внешнего механического напряжения [1]. Интерес к изучению сегнетоэластиков связан не только с фундаментальными исследованиями, но и с возможностью их практического применения, в частности, в ультразвуковых линиях задержки. Прикладывая механическое напряжение к таким материалам, можно в широких пределах изменять их модуль упругости, что приводит к изменению скорости прохождения сигнала [2].

Целью работы являлось изучение механической нелинейности чистого собственного сегнетоэластика $KH_3(SeO_3)_2$, который при температуре T_C = -61,6 °C испытывает сегнетоэластический фазовый переход с возникновением спонтанной деформации x_{55} [3].

Методика эксперимента

Кристаллы выращены из пересыщенного водного раствора методом снижения температуры от 42 °C со скоростью 0,1 град за трое суток. При этом кристалл рос со скоростью ~ 1,5 мм в сутки.

Измерения проводились на установке [4], в основе которой лежит обращенный крутильный маятник, позволяющей осуществлять измерение зависимости деформации образца от приложенного крутильного напряжения и определять декремент затухания свободных механических колебаний и упругие константы материала.

Образцы представляли собой прямоугольные бруски размером 2×2×20 мм^3 с длиной вдоль оси *Z* кристалла.

Исследуемый образец помещался в вакуумный криостат, позволяющий регулировать температуру образца с погрешностью не более 0,2 °C.

Расчет сдвиговых коэффициентов упругой жесткости

Решение задачи о кручении упругого анизотропного стержня квадратного сечения [5] позволяет рассчитать сдвиговые коэффициенты упругой жесткости c_{44}, c_{55}, c_{66}, используя экспериментальные значения модулей сдвига. Для образца *Z*-ориентации (рис. 1) аналитическое уравнение будет иметь следующий вид

$$s_{44}\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+s_{55}\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}=-2, \qquad (1)$$

© Гриднев С.А., Попов И.И., 2018

где ψ(x, y) – функция напряжений, s_{44} и s_{55} – коэффициенты упругой податливости. Аналогичные уравнения можно записать для образцов *X*- и *Y*-ориентаций.

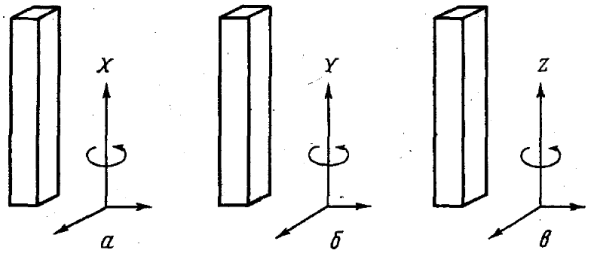


Рис. 1. Ориентация измеряемых образцов:
а) $G_x = f(c_{55}, c_{66})$, б) $G_y = f(c_{44}, c_{66})$, в) $G_z = f(c_{44}, c_{55})$

Запишем уравнение колебаний образца длиной *l* и подвесной системы маятника с моментом инерции *J*

$$\omega^2 Jl = 2\int_0^a\int_0^b \psi \, dx \, dy, \qquad (2)$$

где ω – частота колебаний, *a* и *b* – размеры прямоугольного сечения образца.

Решением уравнения (1) является выражение

$$\psi = \frac{32ab}{\pi^4}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty}\frac{1}{kl}\frac{\sin\frac{k\pi x}{a}\sin\frac{l\pi y}{b}}{\frac{k^2}{c_{44}}+\frac{l^2}{c_{55}}}. \qquad (3)$$

Если основание образца имеет форму квадрата, то частота колебаний будет описываться следующим выражением

$$\omega^2 = \frac{64a^4}{J\pi^6 l}\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty}\frac{1}{k^2l^2}\frac{1}{\frac{k^2}{c_{44}}+\frac{l^2}{c_{55}}}. \qquad (4)$$

Формула, определяющая модуль сдвига для образцов данной геометрии, имеет вид

$$G = \frac{128Jlf^2}{a^4}. \qquad (5)$$

Получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} G_z &= 2{,}67\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty}\frac{1}{k^2l^2}\frac{1}{\frac{k^2}{c_{44}}+\frac{l^2}{c_{55}}} \\ G_x &= 2{,}67\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty}\frac{1}{k^2l^2}\frac{1}{\frac{k^2}{c_{55}}+\frac{l^2}{c_{66}}} \\ G_y &= 2{,}67\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty}\frac{1}{k^2l^2}\frac{1}{\frac{k^2}{c_{44}}+\frac{l^2}{c_{66}}} \end{aligned} \qquad (6)$$

Таким образом, решив систему уравнений (6) для определенной температуры, можно найти сдвиговые коэффициенты упругой жесткости c_{44}, c_{55} и c_{66}.

Из системы уравнений (6) видно, что в выражение для модуля сдвига образцов Y-ориентации не входит компонента c_{55}, аномально изменяющаяся с температурой. В этом случае изменение G_y при фазовом переходе не связано с температурной зависимостью c_{55}, а обусловлено только изменением симметрии в окрестности температуры фазового перехода. Поэтому далее будем исследовать образцы *Z*-ориентации.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена петля механического гистерезиса $x_{55}(\sigma_{55})$.

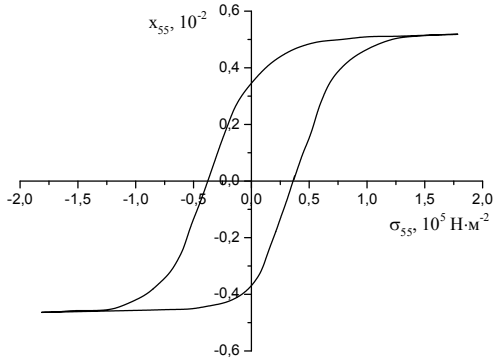


Рис. 2. Петля механического гистерезиса для сегнетоэластика $KH_3(SeO_3)_2$ при T = -72 °C

Видно, что под действием квазистатического сдвигового механического напряжения σ_{55} происходит переключение кристалла подобно переключению сегнетоэлектрика под действием внешнего электрического поля [6].

Сегнетоэластики являются нелинейными диэлектриками, так как деформация нелинейно зависит от приложенного механического напряжения. Существуют эффективная и реверсивная нелинейности. Для эффективной нелинейности зависимость упругой податливости *S* от внешнего механического напряжения описывается формулой

$$S \approx \frac{x_s + x_{инд}}{\sigma}, \qquad (7)$$

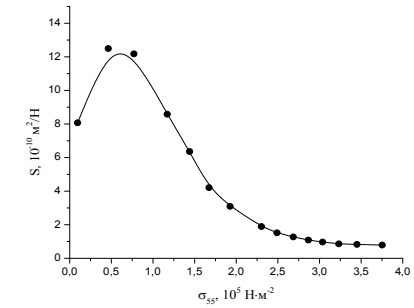
где x_s – спонтанная деформация, $x_{инд}$ - индуцированная деформация. С ростом полной деформации *x* сегнетоэластика за счет спонтанной деформации увеличивается значение *S*. При определенной величине внешнего механическо-

го напряжения сегнетоэластик становится монодоменным, и дальнейшее увеличение полной деформации обеспечивается в основном вкладом индуцированной деформации $x_{инд}$. Поэтому зависимость $x(\sigma)$ проходит через максимум.

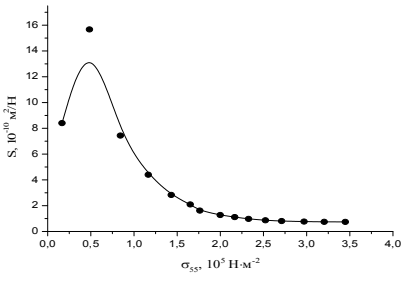
Эффективную упругую податливость находят по зависимости $x(\sigma)$ как тангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат в любую точку с координатами $x_i\sigma_i$.

Реверсивная упругая податливость измеряется в слабом поле высокой частоты при одновременном приложении большого постоянного смещающего механического напряжения. Далее будем исследовать эффективную упругую податливость.

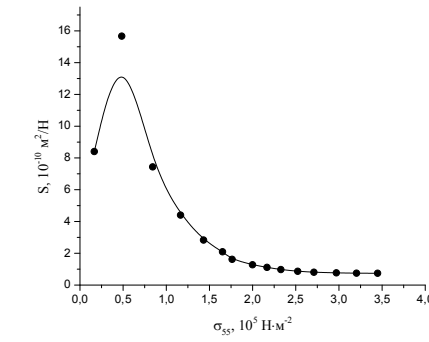
На рис. 3 представлены зависимости эффективной упругой податливости S от сдвигового механического напряжения σ_{55} для кристалла $KH_3(SeO_3)_2$ при разных температурах.



а)



б)



в)

Рис. 3. Зависимости S от σ_{55} при различных температурах: а) -120 °С; б) -90 °С; в) -72 °С

Видно, что зависимости $S(\sigma_{55})$ проходят через ярко выраженный максимум. Максимальное значение эффективной упругой податливости $S_{эф}$ наблюдается при таких значениях сдвигового напряжения σ_5, когда число доменных стенок наибольшее. Изменение податливости при переходе из полидоменного в монодоменное состояние свидетельствует об определяющем влиянии движения доменных стенок на упругие свойства сегнетоэластика [7].

Мерой нелинейности сегнетоэластика по переменному механическому напряжению является коэффициент эффективной нелинейности $K_{эф}$, определяемый отношением максимального значения S_{max} к начальному значению S_{min}:

$$K_{эф} = \frac{S_{\max}}{S_{\min}}. \qquad (8)$$

Температурная зависимость коэффициента эффективной нелинейности показана на рис. 4.

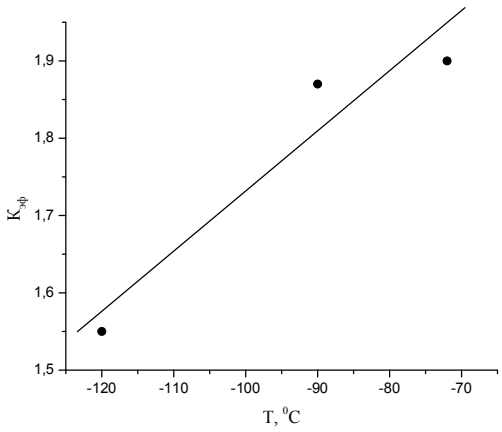


Рис. 4. Зависимость $K_{эф}$ от Т для кристалла $KH_3(SeO_3)_2$

Крутильные напряжения, приложенные к образцу, приводят к возникновению сил, действующих на границы доменов, движение которых и является ответственным за перестройку исходной доменной структуры. Увеличение $K_{эф}$ при приближении к температуре фазового перехода сегнетоэластика $KH_3(SeO_3)_2$ (T_C = -61,6 °С) связано с тем, что структура кристалла становится более лабильной и податливой к внешним воздействиям [5]. Это приводит к росту подвижности доменных стенок и увеличению коэффициента эффективной нелинейности.

Заключение

Проведены измерения упругой податливости образцов Z-ориентации чистого собственного сегнетоэластика $KH_3(SeO_3)_2$ при различных температурах. Обнаружены существенно нелинейные зависимости податливости от сдвигового механического напряжения,

связываемые с переходом кристалла из полидоменного в монодоменное состояние. Увеличение коэффициента эффективной нелинейности с ростом температуры обусловлено увеличением подвижности доменных стенок при приближении к температуре сегнетоэластического фазового перехода.

Литература

1. Salje E.K.H. Phase transitions in ferroelastic and co-elastic crystals // N.Y.: Cambridge university press, 1990. 365 p.

2. Wadhawan V.K. Introduction to ferroic materials // Amsterdam: Gordon and Breach, 2000. 740 p.

3. Шувалов Л.А., Иванов Н.Р., Ситник Т.К. Кристалл $KH_3(SeO_3)_2$ – новый представитель семейства гидроселенидов, диэлектрические аномалии и двойниковая структура // Кристаллография. 1967. Т. 12. № 2. С. 366 – 369.

4. Гриднев С.А., Кудряш В.И., Шувалов Л.А. Петли механического гистерезиса в кристаллах $KH_3(SeO_3)_2$ // Известия АН СССР. 1979. Т. 43. № 8. С. 1718 – 1722.

5. Лехницкий С.Г. Кручение анизотропных и неоднородных стержней. М.: Наука, 1971. 240 с.

6. Strukov B.A., Levanyuk A.P. Ferroelectric phenomena in crystals, physical foundations // Berlin: Springer-Verlag, 1998. 203 p.

7. Gridnev S.A. Low-frequency shear elasticity and mechanical losses in ferroelastics // Ferroelectrics. 2007. Vol. 360. P. 1-24.

Поступила 11.07.2018; принята к публикации 07.09.2018

Информация об авторах

Гриднев Станислав Александрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)246-66-47, e-mail: s_gridnev@mail.ru
Попов Иван Иванович – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79103408128, e-mail: popovich_vano@mail.ru

EFFECTIVE ELASTIC NONLINEARITY OF THE PURE PROPER FERROELASTIC $KH_3(SeO_3)_2$

S.A. Gridnev, I.I. Popov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the object of the study was a single crystal of pure proper ferroelastic $KH_3(SeO_3)_2$, grown by spontaneous crystallization from a supersaturated aqueous solution by the controlled temperature decreasing. It is shown that solving the problem of the torsion of an elastic anisotropic rod of rectangular cross-section using the measured values of shear moduli, it is possible to calculate the shear elasticity coefficients of the crystal. As a result, *Z*-orientation samples of the single crystal $KH_3(SeO_3)_2$ were chosen for carrying out the experiments, since for such orientation of the sample one of the shearing components σ_{55} of the torsional mechanical stress is coupled with the shear component of the spontaneous deformation x_{55}. Using a torsional pendulum, mechanical hysteresis loops $x(\sigma)$ were plotted, evidencing the nonlinear mechanical behavior of the material associated with the transition of the sample from the polydomain to the monodomain state. At different temperatures, the dependences of the elastic compliance on the shear mechanical stress are measured. It was found that below the Curie temperature the shear component of the elastic compliance of s_{55} with a change in the torsional mechanical stress passes through a maximum due to the dynamics of the ferroelectric domain walls. The increase in the coefficient of the effective elastic nonlinearity with increasing temperature is explained by the temperature dependence of the mobility of the domain walls

Key words: ferroelastic, elastic compliance, mechanical nonlinearity, single crystal $KH_3(SeO_3)_2$

References

1. Salje E.K.H. “Phase transitions in ferroelastic and co-elastic crystals”, N.Y., Cambridge university press, 1990, 365 p.

2. Wadhawan V.K. “Introduction to ferroic materials”, Amsterdam, Gordon and Breach, 2000, 740 p.

3. Shuvalov L.A., Ivanov N.R., Sitnik T.K. “Crystal $KH_3(SeO_3)_2$ – a new representative of the family of hydroselenides, dielectric anomalies and twin structure”, *Crystallography (Kristallografiya)*, 1967, vol. 12, no. 2, pp. 366-369.

4. Gridnev S.A., Kudryash V.I., Shuvalov L.A. “The loops of mechanical hysteresis in $KH_3(SeO_3)_2$ crystals”, *Bulletin of the USSR AS (Izvestiya AN SSSR)*, 1979, vol. 43, no. 8, pp. 1718-1722.

5. Lekhnitskiy S.G. “Torsion of anisotropic and inhomogeneous rods” (“Kruchenie anizotropnykh i neodnorodnykh sterzhney”) Moscow, Nauka, 1971, 240 p.

6. Strukov B.A., Levanyuk A.P. “Ferroelectric phenomena in crystals, physical foundations”, Berlin, Springer-Verlag, 1998, 203 p.

7. Gridnev S.A. “Low-frequency shear elasticity and mechanical losses in ferroelastics”, *Ferroelectrics*, 2007, vol. 360. pp. 1-24.

Submitted 11.07.2018; revised 07.09.2018

Information about the authors

Stanislav A. Gridnev, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: s_gridnev@mail.ru
Ivan I. Popov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: popovich_vano@mail.ru