

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

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

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор В.Р. Петренко, д-р техн. наук – Воронеж
Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов, д-р техн. наук – Воронеж
Ответственный секретарь Ю.В. Татаренко – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

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

Телефон: +7 (473) 246-28-63

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2022

12+

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

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

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

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

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

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

E-mail: vestnik@vorstu.ru

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

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

© Voronezh State Technical University, 2022

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Алгоритм планирования пути в трехмерной детерминированной среде с препятствиями на основе метода роя частиц Н.Н. Чернышев, Т.В. Ниженец	7
Применение компонентно-ориентированного подхода при разработке информационных систем с микросервисной архитектурой А.А. Рындин, Д.В. Шитиков	15
Методика построения быстродействующего микропроцессорного регулятора системы автоматического управления центрифуги со специальным видом преобразования передаточной функции А.Н. Анненков, О.В. Белоусова	21
Естественная термическая конвекция ньютоновской жидкости в квадратной камере при постоянном тепловом потоке через «смоченные» поверхности В.И. Рязских, В.А. Сумин	33
Структура многофункциональной системы для контроля состояния технических средств Г.В. Петрухнова, И.Р. Болдырев, М.Г. Усачев	39
$t / (n - 1)$ - вариантное программирование Д. В. Грузенкин, В.В. Едрев, Д.А. Пантелеев	46
Управление инженерным контентом в составе цифровых макетов сборочных единиц А.Н. Юров	57
Разработка программного обеспечения для валидации сетевых стандартов К.И. Никишин	62

Радиотехника и связь

Анализ локализации покрытия ТГц системы связи с 3D-массивом А.В. Башкиров, И.С. Бобылкин, А.А. Кузёмкин, В.Р. Тимошилова	68
Оптимизация теплового режима узла на печатной плате с использованием байесовского подхода Н.В. Ципина, Р.Н. Хорошайлов, И.А. Турецкий	78
Методика оптимизация топологии витков планарной обмотки О.Ю. Денисов, А.А. Моисеенко, С.М. Фёдоров	87
Выделение речи при помощи частично асинхронной микрофонной решетки без повторной выборки А.В. Башкиров, И.С. Бобылкин, А.А. Кузёмкин, В.Р. Тимошилова	93
Антенна с реконфигурируемым уголковым плазменным рефлектором И.А. Баранников, Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров, Б.А. Шиянов	101
Обоснование фрагментации сети с помощью глубокого обучения в беспроводных сетях (5G/LTE) Т. Ле Ань, Т.Л. Во Минь, Б. Данешманд	106

Метод определения параметрической надежности полупроводниковых приборов А.С. Костюков.....	115
---	-----

Машиностроение и машиноведение

Повышение качества изготовления деталей из металлополимерных композиционных материалов В.И. Максименков, М.В. Молод, Д.С. Гребенников.....	122
О воздействии поверхностного окисления при отжиге на пластичность по Эриксену сварных соединений листовых титановых сплавов А.Б. Коломенский, С.В. Шахов, Р.Т. Мустафин, Б.А. Коломенский.....	127
Выбор технологических параметров для получения качественных стальных корпусных отливок посредством компьютерного моделирования Л.С. Печенкина, М.С. Фролов.....	134

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Path planning algorithm in a three-dimensional deterministic environment with obstacles using particle swarm algorithm N.N. Chernyshev, T.V. Nizhenets.....	7
Application of a component-based software engineering in the development of information systems with microservice architecture A.A. Ryndin, D.V. Shitikov.....	15
Procedure for constructing fast microprocessor centrifuge automatic control system regulator with special type of transfer function conversion A.N. Annenkov, O.V. Belousova.....	21
Natural thermal convection of a newtonian fluid in a square cavity with a constant heat flow through "wetted" surfaces V.I. Ryazhskikh, V.A. Sumin.....	33
Structure of multifunctional system for monitoring the condition of technical means G.V. Petrukhnova, I. R. Boldyrev, M.G. Usachev.....	39
t / (n – 1)-variant programming D.V. Gruzenkin, V.V. Edreev, D.A. Panteleev.....	46
Engineering content management as part of digital assembly layouts A.N. Yurov.....	57
Development of software for validation of network standards K.I. Nikishin.....	62

Radio engineering and communication

Localization coverage analysis of THz communication systems with a 3D array A.V. Bashkirov, I.S. Bobylkin, A.A. Kuzyemkin, V.R. Timoshilova.....	68
Optimization of the thermal mode of the node on the printed circuit board using the bayesian approach N.V. Tsipina, R.N. Khoroshaylov, I.A. Turetskiy.....	78
Methodology optimization of the topology of the turns of the planar winding O.Yu. Denisov, A.A. Moiseenko, S.M. Fyedorov.....	87
Speech extraction using a partially asynchronous microphone array without repeated sampling A.V. Bashkirov, I.S. Bobylkin, A.A. Kuzyemkin, V.R. Timoshilova.....	93
Antenna with reconfigurable plasma corner reflector I.A. Barannikov, E.A. Ishchenko, S.M. Fyedorov, B.A. Shiyanov.....	101
The rationale for network slicing using deep learning in wireless networks (5G/LTE) T. Le Anh, T.L. Vo Minh, B. Daneshmand.....	106

Method for determining the parametric reliability of semiconductor devices A.S. Kostyukov	115
---	------------

Mechanical engineering and science of machines

Improving the quality of manufacturing parts from metal-polymer composite materials V.I. Maksimenzov, M.V. Molod, D.S. Grebennikov	122
On the effect of surface oxidation during annealing on the eriksen plasticity of welded joints of sheet titanium alloys A.B. Kolomenskiy, S.V. Shahov, R.T. Mustafin, B.A. Kolomenskiy	127
Selection of technological parameters for obtaining high-quality steel body castings by computer modeling L.S. Pechenkina, M.S. Frolov	134

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.6.001

УДК 004.896

АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ В ТРЕХМЕРНОЙ ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

Н.Н. Чернышев, Т.В. Ниженец

**Институт искусственного интеллекта, МИРЭА – Российский технологический университет,
г. Москва, Россия**

Аннотация: основным фактором повышения эффективности процесса функционирования беспилотных мобильных средств является организация их оптимального движения от начальной до целевой точки без столкновения с препятствиями. Планирование пути допускает, как правило, бесконечное множество решений, поэтому задача построения пути формулируется как оптимизационная задача с целевой функцией, соответствующей минимальной длине маршрута при выполнении ряда ограничений. Решение задачи планирования пути в трехмерном пространстве значительно усложняется по сравнению с движением на плоскости, поскольку вычислительное время, необходимое для решения такой задачи, увеличивается экспоненциально с увеличением размерности пространства. Предлагается алгоритм планирования пути, основанный на оптимизации роя частиц, позволяющий сократить время поиска кратчайшего пути без столкновений в трехмерной детерминированной среде, заполненной статическими выпуклыми препятствиями. Функциональность предложенного алгоритма иллюстрируется моделированием при различном расположении и количестве препятствий. Результаты численных исследований позволяют говорить о том, что разработанный алгоритм на основе метода роя частиц эффективно выполняет планирование пути в трехмерной детерминированной среде со сложным пространственным расположением препятствий

Ключевые слова: планирование пути, трехмерное пространство, детерминированная среда, препятствия, метод роя частиц

Введение

Планирование пути в трехмерном пространстве для решения задач, связанных с перемещением в пространстве беспилотных мобильных средств, широко применяется в таких областях, как океанография, аэрокосмическая промышленность, сельское хозяйство и пр. С распространением беспилотных летательных и подводных аппаратов, движение которых осуществляется в трех измерениях, применение планирования маршрута стало еще более важным. В целом, учитывая начальное и конечное местоположение, в которое должен переместиться мобильный объект, цель планирования пути определяется как определение маршрута к целевой точке без столкновения с трехмерными препятствиями или движения в трехмерной разрешенной области при соблюдении ряда критериев, например, таких как минимальное расстояние, плавность или безопасность пути [1,2,3,4].

Планирование пути в трехмерной среде, в отличие от двухмерной, является более реалистичным, при этом экспоненциально возраста-

ет сложность решения этой задачи с учетом кинематических ограничений автономного мобильного робота [5,6]. С точки зрения оптимизации, решение задачи планирования оптимального трехмерного пути является NP-трудным, поэтому не существует общих решений этой задачи. На текущий момент планирование пути, как правило, выполняется следующими группами алгоритмов:

1. Алгоритмы на основе графов (деревьев), например, быстрого исследования случайного дерева (Rapidly exploring random tree, RRT), вероятностной дорожной карты (Probabilistic Road Maps, PRM), метод на основе диаграммы Вороного, искусственного потенциального поля (Artificial Potential Field, APF) и др. Эта группа алгоритмов обычно разбивает среду на набор ячеек, характеризующих состояние робота (местоположение, угол ориентации в пространстве, скорость или ускорение), и случайным образом происходит поиск возможного пути, т.е. последовательного перехода из одного состояния в другое, характеризующегося функцией затрат [7,8,9].

Для реализации планировщика пути при помощи алгоритмов на основе графов требуется заранее известная информация обо всем

пространстве, в котором возможно перемещение мобильного средства, и расположении в нем статических препятствий. При этом кратчайший путь на построенном графе находится с помощью других алгоритмов оптимизации.

2. Оптимальные алгоритмы поиска по графу, например, Дейкстры (Dijkstra's algorithm), A* (A star), Theta* (Theta star), D* (D star) и др. Основная идея этих алгоритмов заключается в том, чтобы дискретизировать все пространство, в котором осуществляется построение маршрута, на ячейки одинакового размера, при этом каждая ячейка может быть свободна или занята препятствием. Затем выполняется поиск путей на графе для нахождения оптимального маршрута, не пересекающего препятствия [7,8,9].

Решение задачи планирования пути в трехмерном пространстве, по сравнению с двумерным, с использованием оптимальных алгоритмов поиска по графу приводит к дополнительной сложности. Эта сложность связана с увеличением пространства поиска, поскольку если путь представлен набором точек и прямых, проложенных между этими точками, то количество точек, которые необходимо учитывать при планировании пути, значительно увеличивается в трехмерном пространстве. Например, если есть карта из n ячеек для каждой оси и точкой на единицу длины сетки, то общее количество точек сетки увеличивается до n^3 с n^2 в двух измерениях.

3. Алгоритмы, основанные на решении задач оптимального управления с применением линейного или нелинейного программирования. Эти методы моделируют внешнюю среду (кинематические ограничения), а также движение объекта в виде динамической системы, а затем вычисляют функционал с учетом кинематических и динамических ограничений [7,8,9]. Методы планирования пути, основанные на оптимальном управлении, показали свою эффективность для линейных систем, а для нелинейных систем сложность их реализации значительно возрастает.

4. Роевые алгоритмы (алгоритмы поведения, встречающиеся в живой природе), например, генетический, муравьиный, пчелиный алгоритм, метод роя частиц, светлячков и др. Эти алгоритмы основаны на имитации естественного поведения, встречающегося в живой природе, и могут решать многокритериальные и NP-сложные задачи для создания субоптимального пути [7,8,9,10,11,12]. Процесс поиска выполняется на основе правил и моделей пу-

тем итеративной оптимизации, поэтому окончательные результаты решения задачи построения пути во многом зависят от предложенных моделей и количества препятствий в среде. В работе [8] приведено сравнение метаэвристических алгоритмов для решения задачи планирования пути и показано, что алгоритм роя частиц обладает большей скоростью, чем генетический алгоритм, но более чувствителен к параметрической настройке.

Для методов планирования пути первых трех категорий характерно большое время выполнения и локальный захват минимумов, особенно для случаев, когда движение мобильного робота осуществляется с учетом многих ограничений при планировании пути. Следовательно, роевые алгоритмы, особенно метаэвристические, могут быть наиболее подходящими методами планирования пути в трехмерной детерминированной среде.

Постановка задачи

Мобильный робот движется в трехмерном евклидовом пространстве с препятствиями от начальной $SP(x_{SP}; y_{SP}; z_{SP})$ к целевой позиции $GP(x_{GP}; y_{GP}; z_{GP})$ через n путевых точек $WP(x_{WP_i}; y_{WP_i}; z_{WP_i})$, $i=1, \dots, n$, при этом координаты путевых точек заранее не определены (рис. 1).

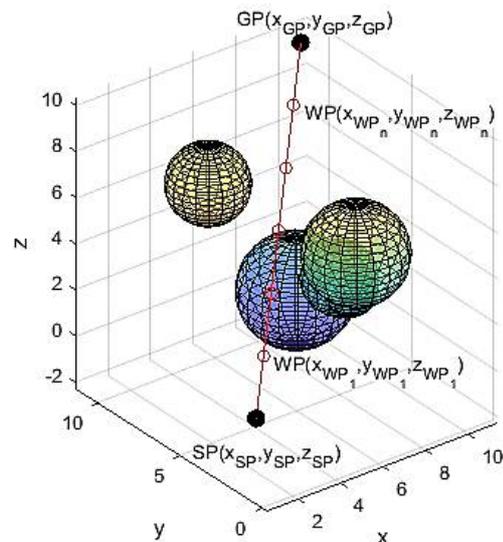


Рис. 1. Пример рабочей области перемещения мобильного средства

Препятствия представлены в форме шара с произвольными координатами центра $C(x_{OB_j}; y_{OB_j}; z_{OB_j})$ и радиусом R_{OB_j} , при условии, что количество препятствий может

быть равно $j=1, \dots, m$. С учетом того, что расстояние между двумя точками $A(x_A; y_A; z_A)$ и $B(x_B; y_B; z_B)$ равно:

$$d = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}, \quad (1)$$

введем обозначения

$$L_1 = (x_{WP_1} - x_{SP})^2 + (y_{WP_1} - y_{SP})^2 + (z_{WP_1} - z_{SP})^2, \quad (2)$$

$$L_2 = \sum_{i=1}^{n-1} (x_{WP_{i+1}} - x_{WP_i})^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (y_{WP_{i+1}} - y_{WP_i})^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (z_{WP_{i+1}} - z_{WP_i})^2, \quad (3)$$

$$L_3 = (x_{GP} - x_{WP_n})^2 + (y_{GP} - y_{WP_n})^2 + (z_{GP} - z_{WP_n})^2. \quad (4)$$

Тогда длина пути из начальной в целевую позицию через путевые точки равна:

$$d(SP, WP, GP) = \sqrt{L_1 + L_2 + L_3}. \quad (5)$$

Сформулируем задачу планирования пути в трехмерной детерминированной среде. При заданных радиусах R_{OBj} и координатах центров $C(x_{OBj}; y_{OBj}; z_{OBj})$ препятствий в форме шара найти координаты путевых точек $WP(x_{WPi}; y_{WPi}; z_{WPi})$, через которые проходит маршрут от начальной $SP(x_{SP}; y_{SP}; z_{SP})$ до целевой позиции $GP(x_{GP}; y_{GP}; z_{GP})$, и при которых минимизируется целевая функция вида

$$J = d(SP, WP, GP), \quad (6)$$

при условии, что полученная траектория не будет иметь общих точек с препятствиями

$$(x_{PP} - x_{OBj})^2 + (y_{PP} - y_{OBj})^2 + (z_{PP} - z_{OBj})^2 > R_{OBj}^2. \quad (7)$$

Описание метода роя частиц для решения оптимизационной задачи планирования пути в трехмерной детерминированной среде с препятствиями

При использовании алгоритма роя частиц рой инициализируется путем задания начальной позиции в пространстве поиска расположения путевых точек и скорости движения каждой частицы в рое. Обычно задают случайное расположение частиц роя в пространстве, но поскольку заданы координаты начальной и целевой позиции, то исходя из поставленной задачи оптимальным будет путь, представля-

ющий собой прямую, проходящую через равноудаленные друг от друга путевые точки при выполнении условия непересечения этой прямой препятствий (7), поэтому в работе предлагается процедура инициализации роя, основанная на этом факте, подробно описанная далее.

Количество частиц на каждой итерации определяется количеством путевых точек. Обозначим положение группы частиц (координаты путевых точек) $x_{i,p}(k)$ ($i=1, 2, \dots, n$, где n – количество путевых точек) в p -мерном пространстве поиска ($p=1, 2, 3$) на k -й итерации алгоритма ($k=1, 2, \dots, M$, где M – размер популяции роя). Будущее положение частицы определяется через перенос $x_{i,p}(k)$ на вектор скорости $v_{i,p}(k+1)$ [13]:

$$x_{i,p}(k+1) = x_{i,p}(k) + v_{i,p}(k+1), \quad (8)$$

где $v_{i,p}(k+1)$ – скорость перемещения частицы из позиции $x_{i,p}(k)$ в позицию $x_{i,p}(k+1)$.

Коррекция скорости каждой частицы определяется выражением [13]:

$$v_{i,p}(k+1) = w(k)v_{i,p}(k) + r_1 c_1 (p_{i,p}(k) - x_{i,p}(k)) + r_2 c_2 (g_p(k) - x_{i,p}(k)), \quad (9)$$

где $w(k)$ – коэффициент инерции; c_1, c_2 – коэффициенты ускорения частицы; r_1, r_2 – коэффициенты, которые могут принимать случайные значения из диапазона $[0; 1]$; $g_p(k)$, $p_{i,p}(k)$ – координаты лучшего положения роя и группы частиц, достигнутые к k -й итерации.

Скорость $v_{i,p}(k)$ служит «памятью» о предыдущем направлении движения частицы. «Память» частицы можно рассматривать как динамику, которая не позволяет ей резко изменить направление своего движения.

Коэффициент инерции w контролирует скорость движения частиц путем определения степени влияния скорости на прошлой итерации на новое значение скорости частиц. Так, например, при $w \geq 1$ скорости частиц со временем увеличиваются до максимального значения (при условии, что используется ограничение), и рой расходится. При $w < 1$ частицы тормозятся до тех пор, пока их скорости не достигнут нуля (в зависимости от значений коэффициентов ускорения).

Чтобы уменьшить время решения оптимизационной задачи, можно использовать ди-

намическое уменьшение коэффициента инерции по формуле:

$$w(k+1) = \alpha w(k), \quad (10)$$

где α – коэффициент меньше 1.

С учетом решения задачи минимизации целевой функции $J(6)$, лучшая личная позиция группы частиц определяется условием:

$$p_{i,p}(k+1) = \begin{cases} p_{i,p}(k) & J(x_{i,p}(k+1)) \geq J(p_{i,p}(k)), \\ p_{i,p}(k+1) & J(x_{i,p}(k+1)) < J(p_{i,p}(k)), \end{cases} \quad (11)$$

Глобальная наилучшая позиция роя является наилучшей позицией, обнаруженной любой группой из n частиц до момента k , и определяется как:

$$g_p(k) = \min \{J(p_{1,p}(k)), \dots, J(p_{M,p}(k))\}. \quad (12)$$

В процессе выполнения алгоритма каждая группа частиц осуществляет свое перемещение в направлении личной $p_{i,p}(k)$ или глобальной $g_p(k)$ лучшей позиции роя в зависимости от значения коэффициентов ускорения частиц c_1 и c_2 . Например, если коэффициенты c_1 и c_2 задать равными друг другу, то частицы будут тяготеть к среднему значению между $p_{i,p}(k)$ и $g_p(k)$. Если задать c_1 и c_2 меньше единицы, это позволит выполнить поиск оптимума в большем пространстве. Существует несколько разновидностей «социальной» структуры взаимодействия частиц в рое, которые определяются образованием перекрывающихся областей, в которых располагающиеся в них частицы могут влиять на направление движения друг друга [13,14]:

- звездная социальная структура, в которой каждая частица может общаться с любой другой частицей роя;
- кольцевая социальная структура, в которой каждая частица общается со своими соседними частицами роя;
- социальная структура колеса, при которой одна частица служит центральной и вся информация от других частиц передается через нее;
- социальная структура пирамиды, образующая трехмерный каркас из частиц роя;
- социальная структура четырех кластеров, в которой четыре кластера формируют связи только с двумя соседними кластерами, при этом частицы внутри кластера связаны минимум с пятью соседними частицами роя;
- социальная структура фон Неймана, где частицы образуют структуру в форме кубической кристаллической решетки.

Предлагается использовать структуру социального взаимодействия частиц роя в форме звездообразной сети, что позволит повысить скорость сходимости к оптимуму.

Движение частиц продолжается, пока не будет достигнуто определенное значение останавливающегося критерия, например, определенного количества повторения вычислений.

Алгоритм планирования пути в трехмерной детерминированной среде с препятствиями на основе метода роя частиц

Численное решение задачи планирования пути в трехмерной детерминированной среде с использованием метода роя частиц проходит в несколько этапов и схематически описывается следующей блок-схемой (рис. 2).

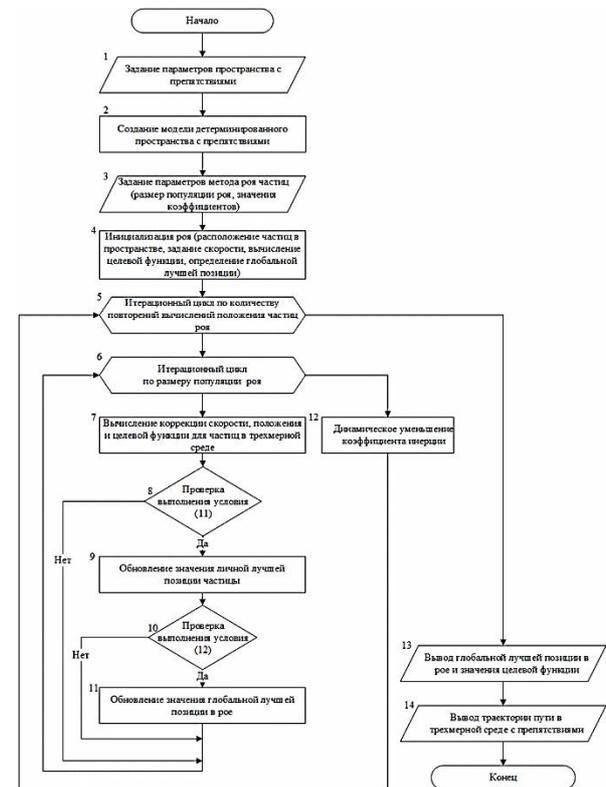


Рис. 2. Блок-схема алгоритма планирования пути в трехмерной детерминированной среде с препятствиями на основе метода роя частиц

Шаг 1. Задание параметров трехмерной детерминированной среды с препятствиями в форме шара (координаты начальной и целевой позиции, количество путевых точек и препятствий, диапазон поиска по переменным пространства).

Шаг 2. Создается модель трехмерной детерминированной среды с препятствиями.

Шаг 3. Задание параметров алгоритма роя частиц: количество частиц в рое на каждой итерации, равное количеству путевых точек n , размер популяции роя M и повторений алгоритма, значения коэффициентов инерции w , ускорения частицы c_1 и c_2 .

Шаг 4. Инициализация роя заключается в следующем:

- на первой итерации ($k=1$) вычисляется расположение частиц роя $x_{i,p}^0(0)$ (координаты путевых точек), находящихся на прямой, соединяющей начальную и целевую позицию;

- на следующих итерациях ($1 < k \leq K$, где K задается экспериментальным путем) частицы располагаются случайным образом в окрестности координат путевых точек, найденных на первой итерации;

- на следующих итерациях ($K < k \leq M$, где M – размер популяции роя) частицы располагаются случайным образом во всем пространстве поиска решения.

При этом на каждой итерации рассчитывается длина пути и проверяется выполнение условия (7). В результате инициализации роя получают начальные координаты путевых точек пути $WP^0(x_{WP_i}^0, y_{WP_i}^0, z_{WP_i}^0)$ в трехмерной детерминированной среде.

Шаг 5 и 6. Выполняется итерационный процесс вычислений заданное число раз и формирования роя размером M .

Шаг 7. Вычисление коррекции скорости группы частиц $v_{i,p}(k+1)$ по формуле (9), положения группы частиц $x_{i,p}(k+1)$ в трехмерной среде по формуле (8) и значения целевой функции при полученных координатах $x_{i,p}(k)$

Шаг 8 и 9. Происходит определение личной лучшей позиции $p_{i,p}(k)$ группы частиц по формуле (11).

Шаг 10 и 11. Происходит определение глобальной лучшей позиции группы частиц в рое $g_p(k)$ по формуле (12).

Шаг 12. Выполняется динамическое уменьшение коэффициента инерции по формуле (10) для повышения быстродействия алгоритма.

Шаг 13. После достижения алгоритмом останавливающего критерия (заданное число повторений) выводится найденное значение целевой функции $J = d(SP, WP^b, GP)$ в гло-

бальной лучшей позиции роя $WP^b(x_{WP_i}^b, y_{WP_i}^b, z_{WP_i}^b)$.

Шаг 14. Отображение найденного пути в трехмерной детерминированной среде.

Моделирование процесса планирования пути в трехмерной детерминированной среде с препятствиями на основе метода роя частиц

Рассмотрим трехмерную детерминированную среду с препятствиями в форме шара с параметрами:

- координаты начальной $SP(1;1;1)$ и целевой позиции $GP(10;10;10)$;

- количество путевых точек $n=3$;

- количество препятствий $m=5$, координаты центра и радиус препятствия задаются случайным образом;

- диапазон поиска по переменным $x \in [0;11]$, $y \in [0;11]$, $z \in [0;11]$.

В результате инициализации роя получена начальная траектория движения, по которой должен двигаться робот в трехмерной детерминированной среде с препятствиями (рис. 3).

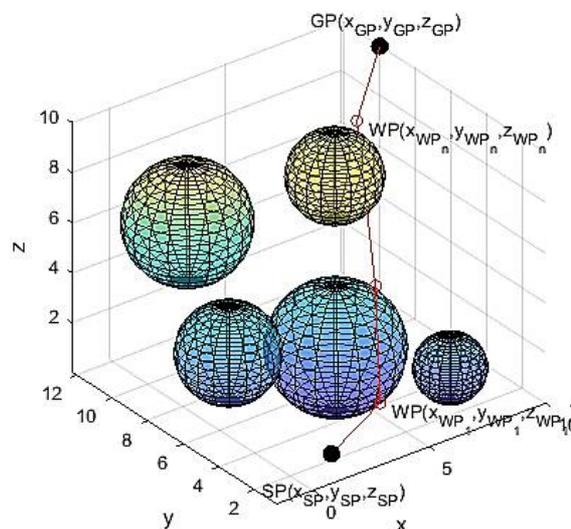


Рис. 3. Начальная траектория движения в трехмерной детерминированной среде с пятью препятствиями

Найденная траектория представляет собой отрезок длиной

$$\min J(WP^b) \approx 16,61 \text{ ед.}$$

ограниченный начальной и целевой позицией и не пересекающийся с препятствиями.

Для планирования пути с использованием метода роя частиц зададим размер популяции роя $M=200$ и повторим вычисления 50 раз, ко-

эффиценты инерции $w=0,8$, $\alpha=0,98$, ускорения частиц $c_1=c_2=0,5$. На рис. 4 приведена спланированная траектория в трехмерной детерминированной среде с пятью препятствиями при использовании метода роя частиц.

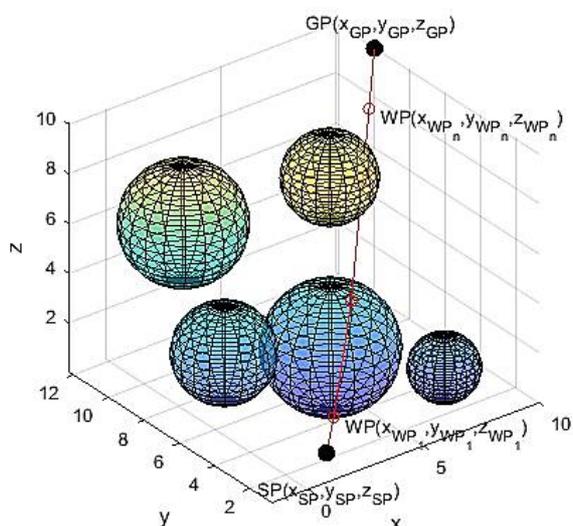


Рис. 4. Путь в трехмерной детерминированной среде с препятствиями, полученный на основе метода роя частиц

Минимальное значение целевая функция принимает при координатах путевых точек:

$$WP^b(x_{WP_i}^b; y_{WP_i}^b; z_{WP_i}^b) = \begin{bmatrix} (1, 69; 1, 47; 1, 97) \\ (4, 02; 3, 51; 8, 44) \\ (1, 97; 4, 92; 8, 79) \end{bmatrix},$$

$$\min J(WP^b) \approx 15,74 \text{ ед.}$$

Проведем планирование пути с использованием метода роя частиц в трехмерной детерминированной среде со сложным пространственным расположением десяти препятствий (рис. 5).

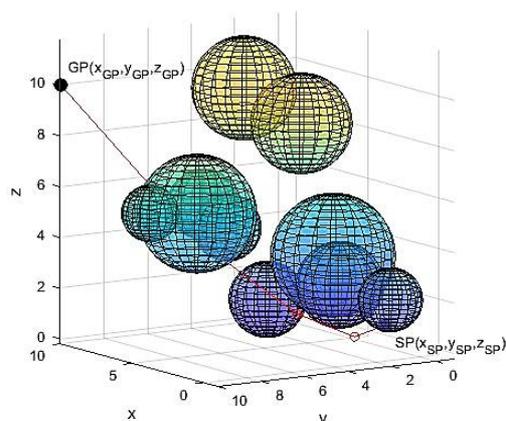


Рис. 5. Путь в трехмерной детерминированной среде с десятью препятствиями, полученный на основе метода роя частиц

Минимальное значение целевой функции равно

$$\min J(WP^b) \approx 16,50 \text{ ед.},$$

при координатах путевых точек:

$$WP^b(x_{WP_i}^b; y_{WP_i}^b; z_{WP_i}^b) = \begin{bmatrix} (1, 63; 1, 97; 0, 54) \\ (3, 19; 3, 59; 1, 38) \\ (6, 32; 5, 92; 3, 89) \end{bmatrix}.$$

Нужно отметить, что в процессе планирования пути разработанным алгоритмом на основе метода роя частиц возникает дополнительная задача исследования быстродействия алгоритма при различных параметрах, например, значениях коэффициентов инерции и ускорения частиц.

Заключение

Разработанный алгоритм планирования пути в трехмерной детерминированной среде с препятствиями на основе метода роя частиц эффективно выполняет планирование пути со сложным пространственным расположением препятствий, а также позволяет исследователю варьировать параметры роя для достижения требуемой точности и затрачиваемого времени при нахождении оптимальной траектории движения мобильного объекта.

Литература

1. Сарапулов А.В. Методы решения задачи построения траектории для беспилотного летательного аппарата в динамической среде // Ракетно-космическая техника. 2017. Т.1. № 2(10). С. 92-102.
2. Морозов Р.О., Горелый Р.О., Рыжов В.А. Интеллектуальные системы навигации и планирования МРТК // Морские информационно-управляющие системы. 2021. № 1(19). С. 34-42.
3. Яковлев К.С., Макаров Д.А, Баскин Е.С. Метод автоматического планирования траектории беспилотного летательного аппарата в условиях ограничений на динамику полета // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. Т.4. С. 3-17.
4. Исследование методов планирования движения в двумерных картографированных средах/ В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, Д.О. Бросалин, М.А. Васильева, Б.В. Гуренко, Н. Хамдан // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 3. С. 170-192. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-3-170-192
5. Aghababa M.P. 3D path planning for underwater vehicles using five evolutionary optimization algorithms avoiding static and energetic obstacles // Applied Ocean Research. 2012. Vol. 38. P. 48-62. DOI: 10.1016/j.apor.2012.06.002
6. Han J. An efficient approach to 3D path planning // Information Sciences. 2019. Vol. 478. P. 318-330. DOI: 10.1016/j.ins.2018.11.045

7. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения // Труды Института системного программирования РАН. 2016. № 28(4). С. 241-294. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14

8. Survey of robot 3D path planning algorithms/ L. Yang, J. Qi, D. Song, J. Xiao, J. Han, Y. Xia // Journal of Control Science and Engineering. 2016. P. 1-22. DOI: 10.1155/2016/7426913

9. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. 2018. №1. С. 15-58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098

10. 3D path planning method for Multi-uavs inspired by Grey Wolf algorithms/ F.K. Farzad Kiani, Amir Seyyedabbasi, Royal Aliyev, Mohammed Ahmed Shah// Journal of Internet Technology. 2021. Vol. 22(4). P. 743-755. DOI: 10.53106/160792642021072204003

11. Path planning in uncertain environment by using Firefly algorithm / B.K. Patle, A. Pandey, A. Jagadeesh, D.R. Parhi // Defence Technology. 2018. Vol. 14(6). P. 691-701. DOI: 10.1016/j.dt.2018.06.004

12. Чернышев Н.Н., Нижнец Т.В. Параметрическая оптимизация модального регулятора с ограничениями на основе метода роя частиц // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22. № 2. С. 76-86. DOI: 10.14529/ctcr220207

13. Engelbrecht A.P. Computational intelligence: An introduction. Second edition. Chichester: Wiley, 2020. 640 p.

14. Kennedy J., Eberhart R.C., Shi Y. Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 512 p.

Поступила 26.09.2022; принята к публикации 15.12.2022

Информация об авторах

Чернышев Николай Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем, Институт искусственного интеллекта, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, г. Москва, пр. Вернадского, 78), e-mail: chernyshev@mirea.ru, тел.+7-989-525-95-69, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3057-9140>

Нижнец Татьяна Владимировна – старший преподаватель кафедры автоматических систем, Институт искусственного интеллекта, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, г. Москва, пр. Вернадского, 78), e-mail: nizhenec@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6230-469X>

PATH PLANNING ALGORITHM IN A THREE-DIMENSIONAL DETERMINISTIC ENVIRONMENT WITH OBSTACLES USING PARTICLE SWARM ALGORITHM

N.N. Chernyshev, T.V. Nizhenets

MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract: the main factor in increasing the efficiency of the process of functioning of unmanned mobile vehicles is the organization of their optimal movement from the starting point to the target point without colliding with obstacles. Path planning allows an infinite number of solutions, so we formulated the path construction problem as an optimization problem with an objective function corresponding to the shortest collision-free path. The solution of the path planning problem in three-dimensional space becomes more complicated compared to the movement on a plane, since the computational time increases exponentially with the increase in the dimension of space. The article proposes a path planning algorithm based on particle swarm optimization to reduce the time of searching for the shortest collision-free path in a three-dimensional deterministic environment filled with static convex obstacles. The functionality of the proposed algorithm is illustrated by simulations with different locations and numbers of obstacles. The results of numerical studies suggest that the developed algorithm based on the particle swarm method effectively performs path planning in a three-dimensional deterministic environment with a complex space distribution of obstacles.

Key words: path planning, three-dimensional space, deterministic environment, obstacles, particle swarm optimization

References

1. Sarapulov A.V. "Methods for solving the problem of constructing a trajectory for an unmanned aerial vehicle in a dynamic environment", *Rocket and Space Technology (Raketno-kosmicheskaya tekhnika)*, 2017, vol. 1, no. 2(10), pp. 92-102.
2. Morozov R.O., Gorelyy R.O., Ryzhov V.A. "Intelligent navigation and planning systems MRTK", *Marine Information and Control Systems (Morskije informatsionno-upravlyayushchie sistemy)*, 2021, no. 1(19), pp. 34-42.
3. Yakovlev K.S., Makarov D.A., Baskin E.S. "Method for automatic planning of the trajectory of an unmanned aerial vehicle under conditions of restrictions on flight dynamics", *Artificial Intelligence and Decision Making (Iskusstvennyy intellekt i prinyatie resheniy)*, 2014, vol. 4, pp. 3-17.
4. Pshikhopov V.H., Medvedev M.Y., Brosalin D.O., Vasil'eva M.A., Gurenko B.V., Hamdan N. "Study of motion planning methods in two-dimensional mapped environments", *News of SFedU. Engineering Sciences (Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki)*, 2022, no. 3, pp. 170-192. DOI: 10.18522/2311-3103-2022-3-170-192
5. Aghababa M.P. "3D path planning for underwater vehicles using five evolutionary optimization algorithms avoiding static and energetic obstacles", *Applied Ocean Research*, 2012, vol. 38, pp. 48-62. DOI: 10.1016/j.apor.2012.06.002

6. Han J. “An efficient approach to 3D path planning”, *Information Sciences*, 2019, vol. 478, pp. 318–330. DOI: 10.1016/j.ins.2018.11.045
7. Kazakov K.A., Semenov V.A. “An overview of modern methods for motion planning”, *Proc. of the Institute for System Programming of the RAS (Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN)*, 2016, no. 28(4), pp. 241-294. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14
8. Yang L., Qi J., Song D., Xiao J., Han J., Xia Y. “Survey of robot 3D path planning algorithms”, *Journal of Control Science and Engineering*, 2016, pp. 1-22. DOI: 10.1155/2016/7426913
9. Liu W. “Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (A Review)”, *Mathematics and Mathematical Modeling (Matematika i matematicheskoe modelirovanie)*, 2018, no. 1, pp. 15-58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098
10. Farzad Kiani F.K., Amir Seyyedabbasi, Royal Aliyev, Mohammed Ahmed Shah “3D path planning method for Multi-UAVs inspired by Grey Wolf algorithms”, *Journal of Internet Technology*, 2021, vol. 22(4), pp. 743-755. DOI: 10.53106/160792642021072204003
11. Patle B.K., Pandey A., Jagadeesh A., Parhi D.R. “Path planning in uncertain environment by using Firefly algorithm”, *Defence Technology*, 2018, vol. 14(6), pp. 691-701. DOI: 10.1016/j.dt.2018.06.004
12. Chernyshev N.N., Nizhenets, T.V. “Particle swarm parametric optimization of a constrained state feedback controller”, *Bulletin of South Ural State University (Vestnik YUUrGU)*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 76-86. DOI: 10.14529/ctcr220207
13. Engelbrecht A.P. “Computational intelligence: An introduction”, second edition. Chichester: Wiley, 2020, 640 p.
14. Kennedy J., Eberhart R.C., Shi Y. “Swarm Intelligence”, Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 512 p.

Submitted 26.09.2022; revised 15.12.2022

Information about the authors

Nikolay N. Chernyshev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Institute of Artificial Intelligence, MIREA - Russian Technological University (78 av. Vernadskogo str., Moscow 119454, Russia), e-mail: chernyshev@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3057-9140>

Tat'yana V. Nizhenets, Assistant Professor, Institute of Artificial Intelligence, MIREA - Russian Technological University (78 av. Vernadskogo str., Moscow 119454, Russia), e-mail: nizhenec@mirea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6230-469X>

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОНЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

А.А. Рындин, Д.В. Шитиков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются программные компоненты и их использование для системного анализа, разработки, ввода в эксплуатацию, управления и обработки информации в информационных системах, основанных на микросервисной архитектуре, а также их последующей поддержки и развитии. Описываемая технология программных компонентов поддерживает создание определенного стиля, включающего компоненты, модели компонентов, интерфейсы, контракты, наборы типов компонентов и каркасы компонентов. Компонентный подход к архитектуре информационных систем рассматривается с точки зрения паттерна разработки, который можно описать с помощью моделирования взаимодействия компонентов разных типов. Представленная компонентная модель накладывает ограничения на разработчиков компонентов, а структура компонентов обеспечивает соблюдение этих ограничений в дополнение к реализации и предоставлению необходимых услуг. Показаны преимущества перехода на микросервисную архитектуру с использованием абстрактных контрактов для реализации общих для различных систем компонентов. Приводится реализация корпоративного портала, построенного на микросервисной архитектуре и разделенного на отдельные сервисы, включающие систему авторизации, организационную структуру, систему учета времени, систему отпусков, имеющие собственные базы данных и взаимодействующие между собой через API. Приведен листинг кода реализации модели компонента на языке java. Для данных сервисов выделены общие интерфейсы, позволяющие разделять одни зависимости

Ключевые слова: компонентно-ориентированный подход, интерфейс, контракт, модель компонентов, диаграмма компонентов

Введение

Длительное время в качестве основополагающей концепции управления архитектурой приложений служил монолитный подход, не разделяющий уровни интерфейсов и их целевое использование, но за развитием и глобализацией облачных технологий последовало разочарование в традиционном стиле организации сервиса [1].

Сложность информационных систем стремительно нарастала, что повлекло за собой увеличение временных издержек при разработке и тестировании функциональности при внесении изменений в приложение, а также необходимость концентрации дополнительного внимания на сохранении совместимости ее частей.

Первоначально приведенные проблемы попытались решить путем обособления уровней интерфейса в рамках монолитной архитектуры:

- 1) пользовательские интерфейсы;
- 2) базы данных;
- 3) бизнес-логика.

Таким образом произошла дифференциация программного кода на фронт-энд и бэк-энд, но существенных методов решения вышеназванных проблем данная концепция предложить не могла, поскольку все еще имела ряд недостатков [2]:

1. Повышенный риск недоступности и ошибок функционирования всей информационной системы из-за потребности в более кропотливом тестировании крупного монолита с широким набором взаимозависимых сервисов.

2. Высокие трудозатраты при масштабировании информационной системы.

3. Существенные временные издержки при реализации и, соответственно, более редкий выпуск обновлений.

4. Необходимость пересборки всего приложения при внесении изменений.

5. Последовательное усложнение кода при развитии системы ведет к потере обособленности сервисов, из-за чего систему труднее поддерживать.

В качестве одного из решений был предложен переход на микросервисную архитектуру [3].

Описание компонентно-ориентированного шаблона разработки информационных систем

Одной из сложностей работы с несколькими сервисами является дублирование кода, оперирующего одними сущностями приложения. Эффективным решением стало применение компонентно-ориентированного подхода.

Компонентно-ориентированные системы считаются следствием выбора стратегии системного анализа и управления информационными системами, основанной на компонентах и содержащей в себе концепции и продукты, поддерживающие данную идеологию.

Компонентный подход к архитектуре информационных систем является отражением паттерна разработки, который можно описать с помощью моделирования взаимодействия компонентов разных типов [4] (рис. 1). Данное отражение сопряжено с тем, что технология компонентов программного обеспечения выступает как часть развернутой информационной системы или приложения, а не ограничивается сущностью инструмента разработки. Данный шаблон применяется и описывается в коммерческом программном обеспечении, таком как JavaBeans от Oracle [5] и COM+ от Microsoft [6].

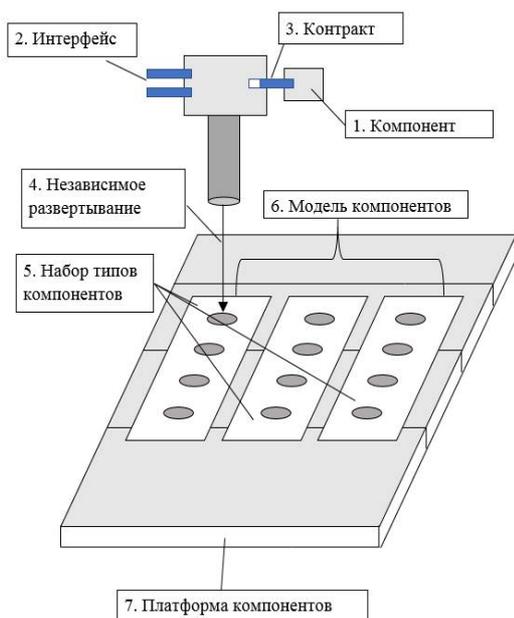


Рис. 1. Компонентно-ориентированный шаблон разработки информационных систем

В качестве основных элементов компонентно-ориентированного стандарта для системного анализа и управления обычно используют [7]:

1. Компонент.

Компонент является сущностью программной реализации, которая может выполняться на физическом или логическом устройстве, объединяющей две позиции на компонент - как на реализацию, где компоненты могут быть развернуты и помещены в состав более крупных систем, и как на архитектурную абстракцию, накладывающую ограничения в виде набора стандартов и соглашений на все компоненты.

2. Интерфейс.

Интерфейсы определяют характеристики, приводящие к взаимозависимостям компонентов, при этом абстрактные интерфейсы не зависят от реализации, а связанные — неотделимы от нее, проявляя, таким образом, свойства, которых не было в абстрактном интерфейсе.

3. Контракт.

Контракты являются обязательствами, выполняемыми в интерфейсе, акцентирующими внимание на спецификации моделей взаимодействия и взаимозависимостей соучастников данных взаимодействий. Контракты компонентов представляют паттерны взаимосвязей, базирующиеся на компоненте, а контракты взаимодействия отражают абстрактные шаблоны взаимодействия внутри назначений компонентов.

4. Независимое развертывание.

Независимое развертывание компонентов гарантируется условными обязательствами в контрактах.

5. Набор типов компонентов.

Любой компонент осуществляет самостоятельную функцию системы.

6. Компонентная модель.

Компонентная модель отображает набор типов компонентов, а также их интерфейсы и спецификацию паттернов, описывающих взаимодействие между данными типами, определяющих требования к разработке компонентов, которые сопровождаются декларацией общесистемных атрибутов качества, что приводит к исключению источников несоответствия интерфейсов и быстрой развертывания компонентов.

7. Платформа компонентов.

Платформа компонентов является набором сервисов, сопровождающих реализацию компонентной модели и ее поддержку.

При этом основными достоинствами компонентного подхода, по мнению авторов, являются:

1. Самостоятельность компонентов.

Недостаток гибкости в монолитах усложняет внесение изменений в ИС, в то время как компонентная модель диктует правила создания и расширения компонентов, что влечет за собой независимую разработку и развертывание дополнений.

2. Реестр компонентов.

Компонентные модели указывают на эталоны, гарантирующие, что для независимо сформированных компонентов будет обеспечено развертывание в единой среде.

3. Сокращение времени разработки.

Трудозатраты на системный анализ, управление и обработку информации уменьшаются за счет ранее принятых и реализованных архитектурных решений в инфраструктуре и модели компонентов.

4. Увеличение надежности.

Поскольку компонентные модели предписывают стандарты для системного анализа и управления, все развернутые компоненты системы поддерживают глобальные свойства для обеспечения безопасности, масштабируемости и других свойств, наличие которых определяет предсказуемость функционирования ПО при внесении любых изменений.

Реализация компонентно-ориентированной разработки информационных систем

Примером практической реализации компонентных платформ являются компонентные фреймворки, как Laravel, Symfony, Spring, .NET [8].

Рассмотрим компонентный подход на примере разработки на языке Java микросервисной архитектуры корпоративного портала, включающего в себя следующие сервисы (рис. 2):

- система авторизации;
- система учета времени сотрудников;
- организационная структура;
- система отпусков.

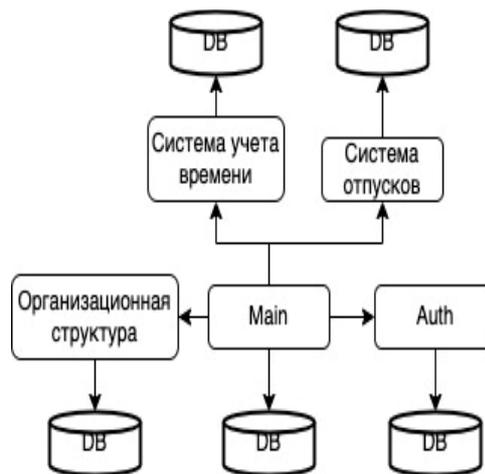


Рис. 2. Структура микросервисного приложения

На рис. 3 показаны диаграммы компонентов каждого сервиса.

Анализируя диаграммы компонентов, можно выделить общие интерфейсы, которые могут быть реализованы в разных сервисах.

Общие интерфейсы для реализации в сервисах

Сервис	Интерфейс				
	Сотрудник	Проект	База данных	API клиент	Календарь
main	+		+	+	
система авторизации	+		+	+	
система учета времени	+	+	+	+	+
организационная структура	+	+	+	+	
система отпусков	+		+	+	+

Как пример, все микросервисы используют сущность «Сотрудник», имеющую отношения с другими сущностями. Сложность поддержки подобной системы заключается в обновлении всех микросервисов при изменении структуры «Сотрудник».

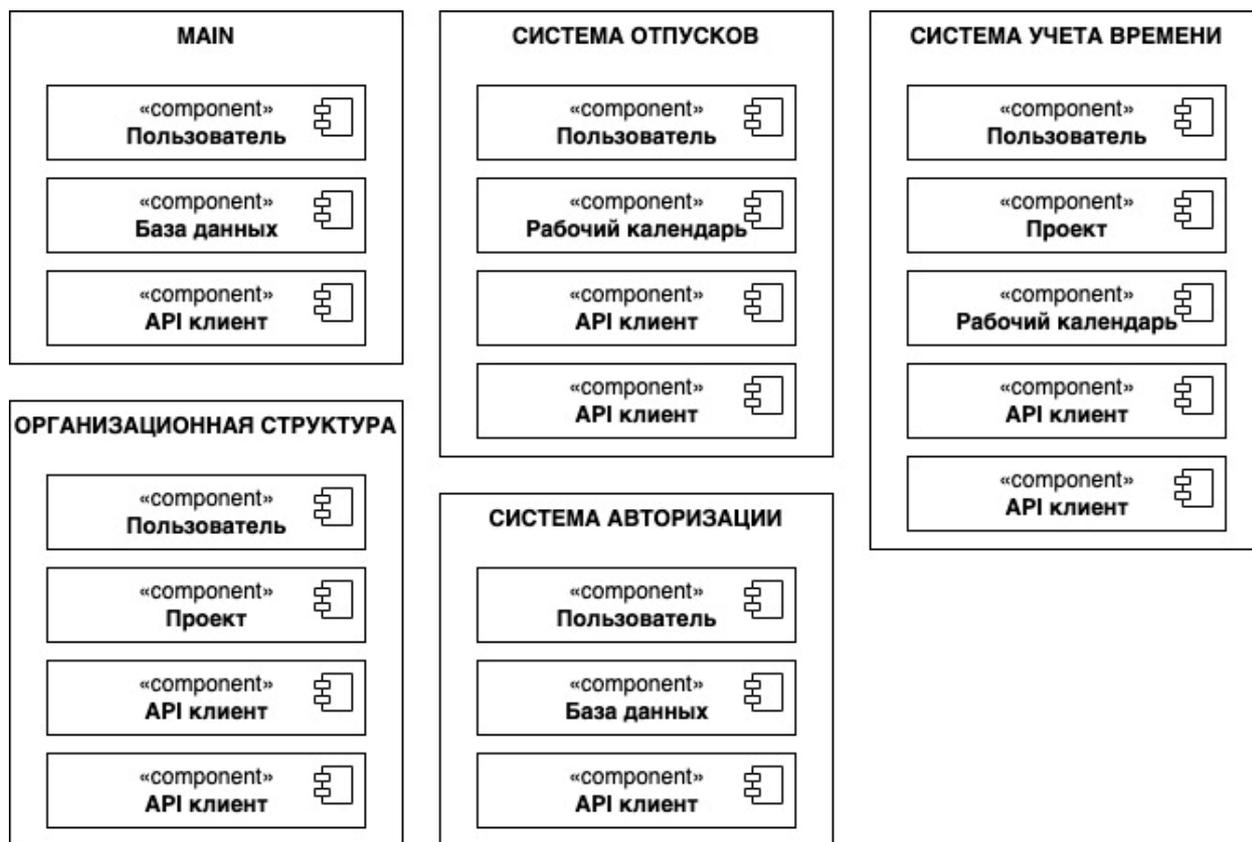


Рис. 3. Диаграммы компонентов сервисов

Имея общие интерфейсы, можно выделить соответствующие им компоненты в отдельную реализацию и переиспользовать их в виде зависимостей в нескольких микросервисах. Вынесем модель «Сотрудник» («Employee») для взаимодействия с базой данных в отдельный компонент. Создадим отдельный репозиторий, в котором опишем все модели и отношения между ними.

Пример описания модели «Employee» для компонента:

```

@Entity
@Getter
@Setter
@NoArgsConstructor
@AllArgsConstructor
@Builder
@Table(name = "employee")
@SequenceGenerator(name = "app_sequence_generator",
    sequenceName = "employee_id_seq", allocationSize = 1)
public class EmployeeEntity
    extends BaseEntity
    implements EmployeeContract {

    @NotEmpty(message = "Last name should not be empty")
    @Size(min = 2, max = 30,
        message = "Last name between 2 and 20")

    @Column(name = "last_name")
    private String lastName;
    
```

```

@Column(name = "first_name")
private String firstName;
    
```

```

@Column(name = "second_name")
private String secondName;
    
```

```

@Column(name = "birthday_date")
private LocalDate birthdayDate;
    
```

```

@NotEmpty(message = "Login should not be empty")
@Size(min = 2, max = 30,
    message = "Login between 2 and 20")
@Column(name = "login", unique = true)
private String login;
    
```

```

@NotEmpty(message = "Email should not be empty")
>Email
@Column(name = "corp_email", unique = true)
private String corpEmail;
    
```

```

@NotEmpty(message = "Position should not be empty")
@Column(name = "position")
private String position;
    
```

```

@NotEmpty(message = "Guid should not be empty")
@Column(name = "guid", unique = true)
private UUID guid;
    
```

```

@Column(name = "gender_code",
    updatable = false, insertable = false)
private String genderCode;
    
```

```

@OneToMany(cascade = CascadeType.ALL,
    orphanRemoval = true)
private List<Employee> employees;
    
```

```

mappedBy = "employee")
private Set<EmployeeExternalSystemId>
employeeExternalSystemIdSet;

@ManyToOne(fetch = FetchType.LAZY)
@JoinColumn(name = "gender_code",
    nullable = false, referencedColumnName = "code")
private GenderType genderType;
@OneToMany(cascade = CascadeType.ALL,
    mappedBy = "employee")
private Set<EmployeeWorkStatus>
employeeWorkStatusSet;
}

```

Теперь можно создать jar архив данного компонента и использовать его во всех микросервисах в качестве зависимости (рис. 4).

```

<dependency>
  <groupId>ru.service.backend</groupId>
  <artifactId>java-model</artifactId>
  <version>1.0.0</version>
</dependency>

```

Рис. 4. Зависимость в разных микросервисах на один компонент

Заключение

Показана модель микросервисной архитектуры приложения, использующая между сервисами общие компоненты. При последующих изменениях в компонентах будет достаточно изменить зависимость в микросервисах на другую версию компонента, что позволяет при создании и сопровождении приложений:

- 1) избежать дублирования кода;
- 2) повторно переиспользовать компоненты в различных приложениях, не повышая их связности;
- 3) автоматизировать процесс развертывания приложений.

Системы, основанные на компонентном подходе, опираются на шаблон проектирования, включающий в себя такие технические концепции, как компонент, интерфейсы и контракты компонентов.

Независимость компонентов друг от друга позволяет гибко обновлять систему в целом, повысить скорость разработки и развертывания системы, а также облегчить поддержку нескольких сервисов, оперирующих одними объектами.

Литература

1. Plummer D.C., Cearley D.C., Smith D.W. Cloud Computing Confusion Leads to Opportunity // Report № G00159034. Gartner Group, 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/337085937_Insights_of_Trends_and_Developments_in_Cloud_Computing (дата обращения 07.09.2022).
2. Mazlami G., Cito J., Leitner P. Extraction of microservices from monolithic software architectures // IEEE International Conference on Web Services (ICWS). 2017. P. 524–531.
3. Balalaie A., Heydarnoori A., Jamshidi P. Microservices Architecture Enables DevOps: Migration to a Cloud-Native Architecture // IEEE Software. 2016. Vol. 33. No. 3. P. 42–52.
4. Кулямин В.В. Технологии программирования. Компонентный подход. М.: Просвещение/Бином, 2014. 463 с.
5. JavaBeans [Электронный ресурс] / Режим доступа <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/javabeans/> (дата обращения 28.08.2022)
6. COM+ (Component Services) [Электронный ресурс] / Режим доступа <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/cos-sdk/component-services-portal> (дата обращения 28.08.2022)
7. Technical Concepts of Component-Based Software Engineering / Felix Bachmann, Len Bass, Charles Buhman and others. SEI Joint Program Office, 2000. 65 p.
8. Budden Ph., Murray F. MIT's Stakeholder Framework for Building & Accelerating Innovation Ecosystems // Working Paper, MIT's Laboratory for Innovation Science & Policy. 2019. 28 p.

Поступила 16.09.2022; принята к публикации 15.12.2022

Информация об авторах

Рыдин Александр Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexandr.a.rydin@me.com, тел. +7(473) 243-77-04

Шитиков Дмитрий Викторович – канд. экон. наук, магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vrnvgasu@yandex.ru, тел. +7(473) 243-77-04

APPLICATION OF A COMPONENT-BASED SOFTWARE ENGINEERING IN THE DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEMS WITH MICROSERVICE ARCHITECTURE

A.A. Ryndin, D.V. Shitikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses software components and their use for system analysis, development, commissioning, management and information processing in information systems based on microservice architecture, as well as their subsequent support and development. The described technology of software components supports the creation of a specific style, including components, component models, interfaces, contracts, sets of component types, and component frameworks. The component approach to the architecture of information systems is considered from the point of view of a design pattern, which can be described by modeling the interaction of components of different types. The component model presented imposes constraints on component developers, and the component design enforces these constraints in addition to implementing and providing the necessary services. The advantages of switching to a microservice architecture using abstract contracts for the implementation of components common to various systems are shown. The implementation of a corporate portal built on microservice architecture and divided into separate services, including an authorization system, an organizational structure, a time tracking system, a vacation system, which have their own databases and interact with each other via API, is presented. The code listing of the implementation of the component model in the java language is given. For these services, common interfaces are allocated that allow sharing the same dependencies.

Key words: component-based software engineering, interface, contract, component model, component diagram

References

1. Plummer D.C., Cearley D.W., Smith D.M. “Cloud computing confusion leads to opportunity”, report no. G00159034, Gartner Group, 2017, available at: https://www.researchgate.net/publication/337085937_Insights_of_Trends_and_Developments_in_Cloud_Computing (date of access: 07.09.2022).
2. Mazlami G., Cito J., Leitner P. “Extraction of microservices from monolithic software architectures”, *IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*, 2017, pp. 524–531.
3. Balalaie A., Heydarnoori A., Jamshidi P. “microservices architecture enables devops: migration to a cloud-native architecture”, *IEEE Software: journal*, 2016, 1 May, vol. 33, no. 3, pp. 42–52.
4. Kulyamin V.V. “Programming technologies. Component approach” (“Tekhnologii programirovaniya. Komponentnyy podkhod”), Moscow: Prosveshchenie / Binom, 2014, 463 p.
5. JavaBeans, available at: <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/javabeans/> (date of access: 28.08.2022)
6. COM+ (Component Services), available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/cosdk/component-services-portal> (date of access: 28.08.2022)
7. Bachmann F., Bass L., Buhman Ch. et al. “Technical concepts of component-based software engineering”, SEI Joint Program Office, 2000, 65 p.
8. Budden Ph., Murray F. “MIT’s stakeholder framework for building & accelerating innovation ecosystems”, Working Paper, MIT’s Laboratory for Innovation Science & Policy, 2019, 28 p.

Submitted 16.09.2022; revised 15.12.2022

Information about the authors

Aleksandr A. Ryndin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexandr.a.ryndin@me.com, tel. +7(473) 243-77-04
Dmitriy V. Shitikov, Cand. Sc. (Economics), MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: vrnvgasu@yandex.ru, tel. +7(473) 243-77-04

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО МИКРОПРОЦЕССОРНОГО РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЦЕНТРИФУГИ СО СПЕЦИАЛЬНЫМ ВИДОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ

А.Н. Анненков, О.В. Белоусова

Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: выбор регулятора системы автоматического управления определяется требованиями к закону изменения задаваемой величины, характер которого определяющим образом влияет на качество технологического процесса и основные потребительские характеристики оборудования. С помощью математических пакетов можно получить Z -преобразованную передаточную функцию регулятора при определенном значении периода квантования. Округление коэффициентов Z -функции даже в третьем – четвертом знаке в быстродействующих системах приводит к потере регулятором своих статистических свойств, что создает определенные сложности при реализации дискретной модели. При моделировании дискретного регулятора значение периода квантования по времени должно быть больше или равно значению времени выборки, которое указывается при вводе величин в блоке дискретной трансфер-функции. При невыполнении данного условия регулятор потеряет свои свойства. При моделировании дискретных регуляторов, в которых применяются Z -преобразования, их заменяют экстраполятором нулевого порядка. Такой приём ощутимо сокращает время на вычисления и снимает необходимость вычислений с дискретностью микроконтроллера. Для получения функций, описывающих закон изменения скорости центрифуги, наилучшие результаты дал метод наименьших квадратов. Участок линейного спада управляющего сигнала вносит сглаживание в зону выхода на стационарный режим работы и при необходимости может быть скорректирован по длительности и амплитуде. С учетом параметров формирования управляющего сигнала можно сказать, что реализация программного пуска системы с постоянным ускорением может быть выполнена на большинстве 8-разрядных микроконтроллеров. Описаны основы новой методики построения быстродействующего микропроцессорного регулятора системы автоматического управления, отличающейся подходами к выбору средств преобразования передаточной функции

Ключевые слова: система автоматического управления, качество технологического процесса, передаточная функция регулятора, быстродействующие объекты, дискретная модель, аппроксимация, закон скорости центрифуги, метод наименьших квадратов, синтез управляющего сигнала, эквивалентная передаточная функция, метод прямого и обратного преобразования Лапласа

Актуальность и проблематика работы

Требуемый закон изменения выходной величины системы автоматического управления часто определяется свойствами регулятора, выбор которого определяющим образом влияет на качество технологического процесса и основные потребительские характеристики автоматизированного оборудования [1, 2]. При этом следует подчеркнуть, что регулятор должен обладать одновременно высоким быстродействием и высокой точностью отработки установленного закона управления.

С помощью различных математических пакетов можно получить Z -преобразованную передаточную функцию регулятора при определенном значении периода квантования [3, 4]. Если округлить коэффициенты Z -функции до третьего – четвертого знака, то это может привести к потере регулятором своих статистических свойств в некоторых системах. Такое по-

ведение свойственно быстродействующим объектам [5, 6] и создает определенные сложности при реализации дискретной модели.

При моделировании дискретного регулятора значение периода квантования по времени должно быть больше или равно значению времени выборки, которое указывается при вводе величин в блоке дискретной трансфер-функции. При несоблюдении данного условия регулятор потеряет свои свойства [7].

При моделировании дискретных регуляторов использование Z -преобразования можно заменить экстраполятором нулевого порядка. При этом нужно указать значение периода квантования в задающей области экстраполятора, которое было указано у дискретного регулятора. Использование экстраполятора нулевого порядка сократит время на вычисления, которое тратилось на перевод линейного регулятора в дискретный, а также снимет необходимость вычислений с дискретностью микроконтроллера [4, 7].

Задача аппроксимации (или интерполяции) функций изменения технологических па-

раметров часто встречается в тех случаях, когда имеются стесняющие обстоятельства по проведению полноценных экспериментов. Причиной может быть бюджет или трудоемкость проведения эксперимента, тогда размер выборки ($x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$) может быть достаточно мал. Причём часто случается так, что аналитическое выражение функции $y(x)$ не известно и получить его по таблице значений функции в ряде случаев невозможно. Поэтому вместо функции изменения технологического параметра $f(x)$ строят другую функцию, которая может быть вычислена и построена на той же таблице значений (совпадает с $f(x)$ в точках $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$) [8].

Результаты экспериментов и аппроксимация полученных данных

Для снятия экспериментальной характеристики разгона центрифуги использовался оптический энкодер E20S2-100-3-N-5-R A2500002005 [9]. Энкодер имеет корпус диаметром 20 мм, выходной вал диаметром 2 мм,

коэффициент передачи 100 имп./об. и выходной сигнал $5 В = \pm 5\%$.

Для фиксации показаний использовался макет цифровой индикации на контроллере ArduinoUno с программой, фиксирующей длительность интервала между двумя входными импульсами в определенные промежутки времени.

Для каждого времени внутри интервала пусковой характеристики было проведено несколько измерений. В результате измерений не было отмечено некорродирующих выбросов показаний.

Для получения функций, описывающих линейный закон скорости центрифуги, использовался метод линейной аппроксимации, а именно, метод наименьших квадратов [10].

После проведения серии экспериментов результаты были сведены в таблицу значений (табл. 1). Далее ставилась задача по определению приближенной функциональной зависимости скорости центрифуги от времени и определению значения параметров аппроксимирующей функции.

Таблица 1

Экспериментальные данные

(ускорение центрифуги 10000 рад / с ²)											
X ₁ , мс	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
Y ₁ , об/мин	0	786	1876	3126	3800	4965	6150	7023	7784	8870	9980
(ускорение центрифуги 20000 рад / с ²)											
X ₂ , мс	0	0.005	0.010	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.048	0.050
Y ₂ , об/мин	0	752	2051	4120	4895	6055	7023	8320	9054	9571	10000

При интерполировании интерполирующая функция строго проходит через узловые точки таблицы вследствие того, что количество коэффициентов в интерполирующей функции равно количеству табличных значений.

Аппроксимация – метод приближения, при котором для нахождения дополнительных значений, отличных от табличных данных, приближенная функция проходит не через узлы интерполяции, а между ними.

Решаем задачу по определению эмпирической формулы аналитического выражения функции, описывающей закон изменения y_i ($i = 1, 2, \dots, n$), значения которой при $x = x_i$ мало отличаются от опытных данных.

Геометрически задача построения функции $f(x)$ по эмпирической формуле состоит в проведении усредненной кривой – кривой, прохо-

дящей через середину области значений (табл. 1, рис. 1).

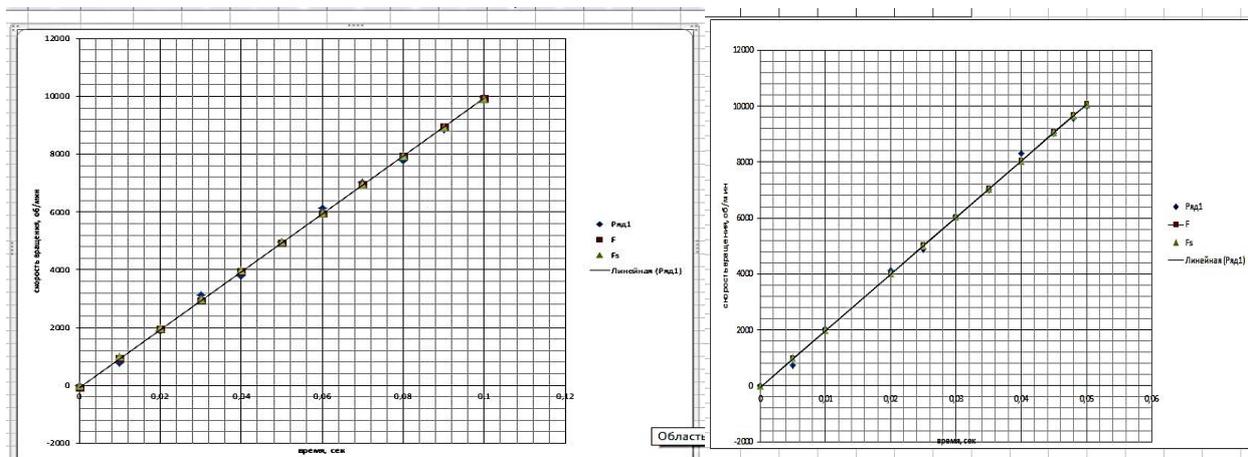
Для получения зависимости определенного вида отметим точки, экспериментально полученные, на графике (рис. 1 - «Ряд 1»).

Интерполяцией входные величины описываются точнее, чем при аппроксимации, однако выбираем в нашем случае аппроксимацию по следующим причинам [8, 11, 12]:

- при большом объеме экспериментальных данных, сведённых в таблицу, интерполирующая функция становится громоздкой;
- нет возможности описать данные при повторении эксперимента в одних и тех же начальных условиях интерполирующей функцией (необходима статистическая обработка для сглаживания погрешностей проведённых экспериментов).

- данные x_i и y_i обычно содержат ошибки, поэтому интерполяционная формула повторяет

эти ошибки.



а) ускорение центрифуги 10000 рад / с²

б) ускорение центрифуги 20000 рад / с²

Рис. 1. Вид аппроксимирующей функции

При построении аппроксимирующей зависимости определим:

- аналитический вид эмпирической формулы;
- наилучшие параметры эмпирической зависимости.

Воспользуемся методом линейной аппроксимации [8, 10].

Из графика (рис. 1 - F) видно, что в качестве аппроксимирующей функции можно выбрать многочлен первой степени. Тогда необходимо построить линейную модель (1), которая наилучшим образом будет описывать наблюдаемые значения:

$$f = ax + b \quad (1)$$

Далее, используя метод наименьших квадратов, найдем значения коэффициентов аппроксимирующей функции: a и b . Для этого введём следующие обозначения для вычислений.

Сумма квадратов отклонений запишется следующим образом:

$$S = S(a, b) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [\varphi(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

Для нахождения a и b необходимо найти минимум функции $S(a, b)$. Необходимое условие существования минимума для функции S :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

или

$$\begin{cases} 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i)x_i = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + b - y_i) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Упростим полученную систему:

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a \sum_{i=1}^n x_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \quad (5)$$

Введём обозначения:

$$SX = \sum_{i=1}^n x_i, SXX = \sum_{i=1}^n x_i^2, SY = \sum_{i=1}^n y_i, SXY = \sum_{i=1}^n x_i y_i. \quad (6)$$

Получим систему уравнений для нахождения параметров a и b :

$$\begin{cases} aSXX + bSX = SXY \\ aSX + bn = SY \end{cases} \quad (7)$$

Из (7) находим:

$$a = \frac{SXY \cdot n - SX \cdot SY}{SXX \cdot n - SX \cdot SX}$$

$$b = \frac{SXX \cdot SY - SX \cdot SXY}{SXX \cdot n - SX \cdot SX} \quad (8)$$

Система уравнений (7) для нахождения параметров a и b для серии экспериментов при ускорении центрифуги 10000 рад / с² будет иметь вид:

$$\begin{cases} 0,0385 a + 0,55 b = 3819,04, \\ 0,55 a + 11 b = 54360 \end{cases}$$

Решая систему, получим значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} a &= 100094,55, \\ b &= -62,91. \end{aligned}$$

Проверим правильность выбора линейной модели (f_1). Для этого вычислим значения ап-

проксимирующей функции $f_1 = 100094,55 \cdot x - 62,91$ и внесем полученные значения в табл. 2.

Система уравнений (7) для нахождения параметров a и b серии экспериментов при ускорении центрифуги 20000 рад / с² будет иметь вид:

$$\begin{cases} 0,0117 a + 0,308 b = 2356,14, \\ 0,308 a + 11 b = 61841 \end{cases}$$

Решая систему, получим значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} a &= 202789, \\ b &= -56,18 \end{aligned}$$

Проверим правильность выбора линейной модели (f_2). Для этого вычислим значения аппроксимирующей функции $f_2 = 202789 \cdot x - 56,18$ и внесем полученные значения в табл. 2.

Таблица 2

Результаты вычислений											
(ускорение центрифуги 10000 рад / с ²)											
X ₁	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
Y ₁	0	786	1876	3126	3800	4965	6150	7023	7784	8870	9980
f ₁ =ax +b	-62.9	938.0	1938.9	2939.9	3940.8	4941.8	5942.7	6943.7	7944.6	8945.6	9946.5
ε _i	62.9	-152.0	-62.9	186.0	-140.8	23.1	207.2	79.2	-160.6	-75.6	33.4
(ускорение центрифуги 20000 рад / с ²)											
X ₂	0	0.005	0.010	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.048	0.050
Y ₂	0	752	2051	4120	4895	6055	7023	8320	9054	9571	10000
f ₂ =ax +b	-56.1	957.7	1971.7	3999.6	5013.5	6027.4	7041.4	8055.3	9069.3	9677.6	10083.3
ε _i	56.1	-205.7	79.2	120.4	-118.5	27.5	-18.4	264.6	-15.3	-106.6	-83.2

Из табл. 2 видно, что значения аппроксимирующей функции хорошо коррелируют с Y для всех точек X. Построим график аппроксимирующей функции (см. рис. 1 - Fs).

Синтез заданных скоростных характеристик центрифуги

На основе полученных данных построим переходные характеристики (рис. 2).

Для синтеза управляющего сигнала, обеспечивающего желаемую скоростную характеристику центрифуги, необходимо получить эквивалентную передаточную функцию системы.

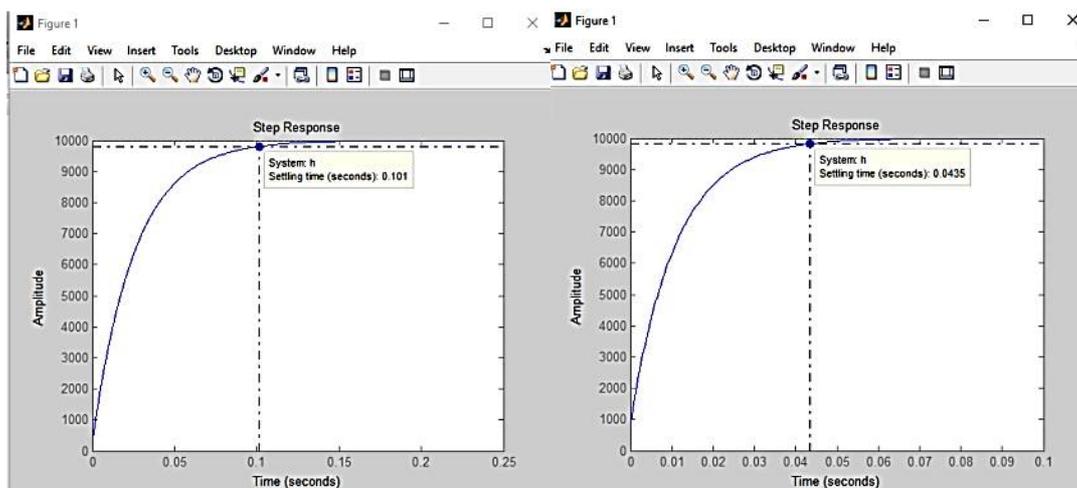
Для решения этой задачи воспользуемся пакетом SystemIdentificationToolbox [13, 14]. Использование пакета базируется на знании дискретных параметров входного и выходного сигналов, а также следующих блоков:

- EstimationData - набор данных, который используется для идентификации объекта. В графическом интерфейсе это то же самое, что и WorkingData;

- ValidationData - набор входных данных для идентификации объекта, из которого исключены недостоверные данные (шумы, постоянные и случайные составляющие и т.п.);

- ModelViews - различные пути просмотра свойств модели (нули и полюса, переходный процесс, частотная характеристика и т.д.);

- DataViews - методы и инструменты просмотра и проверки достоверности данных, позволяющие исключить из рассмотрения точки, которые могут являться ошибочными (нетипичными), периодические всплески или провалы, не характерные для идентифицируемого объекта.



а) Процесс разгона центрифуги $T_p = 100$ мсек

б) Процесс разгона центрифуги $T_p = 50$ мсек

Рис. 2. Переходные характеристики центрифуги

Выходную дискретную характеристику модели получим с шагом дискретизации 0,0002 с на участке разгона ($0 \div 0,1$ с), входной сигнал зададим в виде единичной матрицы такого же размера:

```
>>in=ones(501,1)
```

Импортируем полученные сигналы в SystemIdentificationToolbox и выполняем расчет дискретной передаточной функции Estimate \rightarrow TransferFunctionModel (рис. 3).

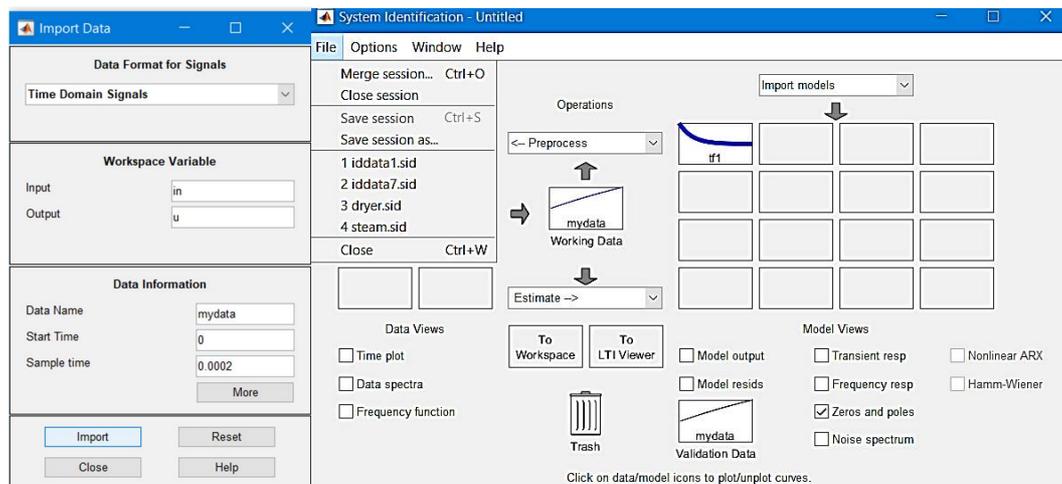


Рис. 3. Интерфейс SystemIdentificationToolbox

Данный блок SystemIdentificationToolbox выдаёт параметры дискретной передаточной

функции с шагом дискретизации импортированного переходного процесса:

- при $T_{\pi} = 100$ мсек:

$$h_{ob} = 0.0135 s + 13.5$$

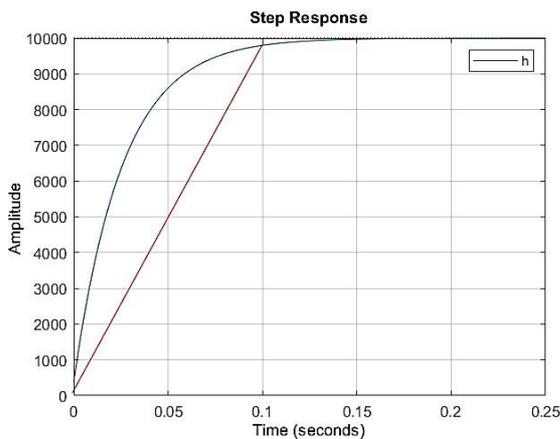
$$0.000035s + 0.00135$$

- при $T_{\pi} = 50$ мсек:

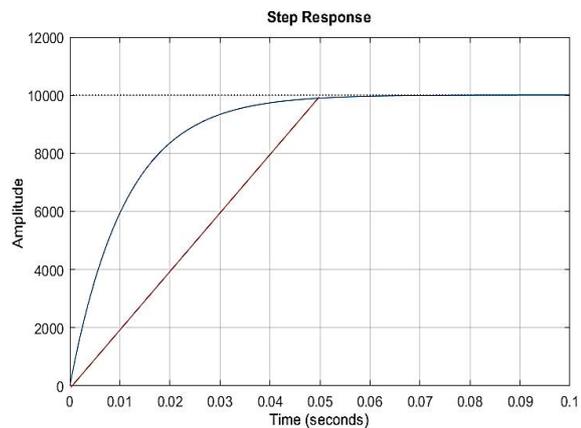
$$h_{ob} = 0.0135 s + 13.5$$

$$0.000015s + 0.00135$$

Для требуемых толщины и равномерности наносимого на кремниевую пластину фоторезиста требуется обеспечить линейный разгон центрифуги в интервале ускорений (10000÷20000) рад/с². Проектируем участок характеристики с временным интервалом работы 0 ÷ 0,1 с и функцией, которую рассчитали ранее $f_1 = 99195,84 \cdot t$ ($f_2 = 210310 \cdot t$) (см. рис. 4).



а) Участок характеристики с временным интервалом работы 0 ÷ 0,1 с



б) Участок характеристики с временным интервалом работы 0 ÷ 0,05 с

Рис. 4. Передаточные функции с линейным участком разгона центрифуги

Воспользуемся классическим методом прямого и обратного преобразования Лапласа, связывающего функцию комплексного переменного (изображение) с функцией вещественного переменного (оригинал) [15].

Используя пакет символьных вычислений SymbolicMathToolbox, определим набор необходимых для вычисления переменных [14, 16]:

- оператор Лапласа (s);
- вектор времени переходного процесса (t);
- изображение выходного сигнала (w);
- математическое выражение выходного сигнала (sig).

Построим график управляющего сигнала с помощью команд (см. рис. 5):

```
>>figure(2),plot(ts,sigd),shg
```

Для проверки расчетов обратимся к функции lsim. Команда lsim(sys, u, t) строит графики процессов для lti-модели sys при входных воздействиях, заданных векторами t, u (рис. 6). Вектор $t = 0:dt:T_{\text{final}}$ задает интервал моделирования. Матрица u должна иметь число строк,

равное длине интервала моделирования length(t), и число столбцов, равное числу входов. Каждая строка $u(i, :)$ задает значения входного сигнала в момент времени $t(i)$.

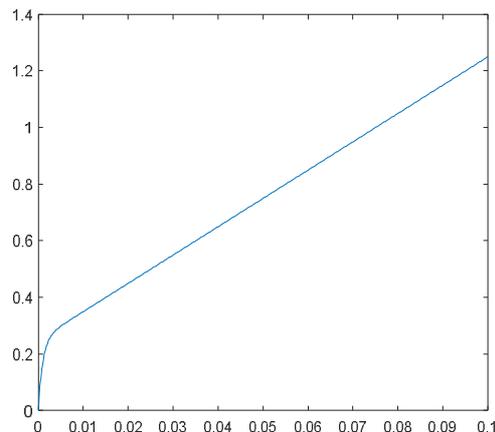


Рис. 5. График управляющего сигнала

Модель sys может быть непрерывной и дискретной, одномерной и многомерной. В дискретной модели вектор u всегда соответствует вектору t и поэтому последний может быть опущен или заменен пустым массивом. В

непрерывной модели интервал между выборками dt используется как период дискретности при преобразовании непрерывной модели в дискретную. Автозамена рассматриваемого параметра осуществляется тогда, когда значение dt достаточно велико и появляется вероятность вызвать скрытые колебания.

```
>>figure(3),lsim(hob,sigd',ts)
```

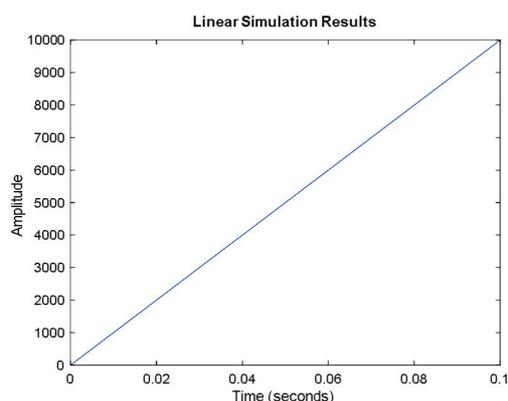


Рис. 6. График процесса для Iti -модели sys при входных воздействиях

Таким образом, задача обеспечения пуска центрифуги с постоянным ускорением решена.

Особенности реализации полученного управляющего сигнала на микроконтроллере системы управления заключаются в следующем: и модель, и характеристики, полученные в результате моделирования, имеют шаг дискретизации по времени $0,0002$ с. Это составляет 200 мкс. Использование встроенных в микроконтроллер таймеров, работающих на частоте 16 МГц и более, по критериям, изложенным в [3], вполне достаточно для обеспечения требуемого уровня квантования по времени (реализации программно-управляемого режима PWM).

Реализация управляющего сигнала на микроконтроллере

Расчетный массив в нашем случае имеет размер 501 точку дискретизации, что даже при уровне дискретизации 8 бит займет весьма большой (практически $0,5$ Кбайта) объем памяти.

Попробуем алгоритмизировать процесс формирования управляющего сигнала и сделаем это при условии использования 8 -разрядного таймера/счетчика, который имеет 255 уровней дискретизации сигнала.

Как видно из графика управляющего сигнала (рис. 5), на участке времени $0,01 \div 0,1$ он

имеет линейный характер. Найдем установившееся значение приращения, используя разностную функцию на соответствующем временном участке:

```
>>mian(diff(sigd(400:408)))
ans =
0.0020
```

Теперь найдём альтернативу начальному участку.

Выделим участок сигнала в 0.02 с (рис. 7):

```
>>i=find(ts<0.02);size(i)
ans =
1 100
>>figure(2),plot(ts(i),sigd(i),shg)
```

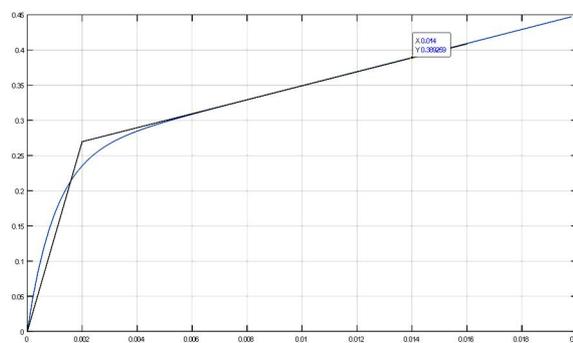


Рис. 7. График управляющего сигнала, разделенный на участки

Составим управляющий сигнал из двух линейных участков (рис. 8). Для отрезка времени $0 \div 0,002$ с приращением $0,029$ и для остального промежутка времени характеристики с приращением $0,002$.

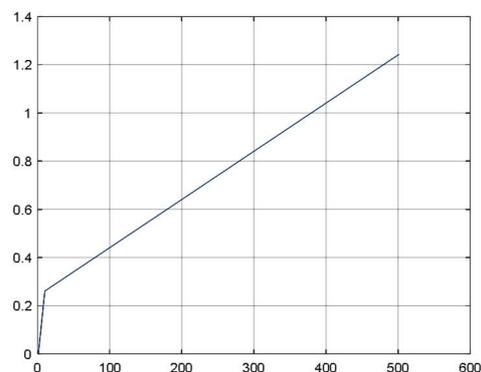


Рис. 8. Результирующий график преобразований

Посмотрим выходную характеристику при таком сигнале (рис. 9).

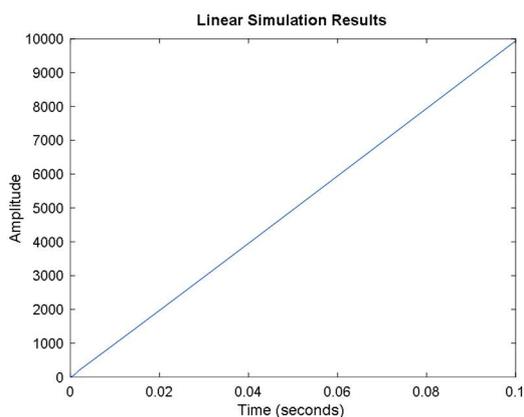


Рис. 9. Выходная характеристика при рассматриваемом сигнале

Выходная характеристика имеет те же параметры, что и исходная, следовательно, такая аппроксимация вполне применима.

Полученная характеристика выполнена с дискретизацией 0,0002 с. Следовательно, квантование управляющего сигнала по времени не влияет на качество работы системы.

Поскольку качество управляющего сигнала определяется не только величиной периода квантования во времени, но и разрешающей способностью формирователя ШИМ, следует определить величину нижней границы микропроцессорного ШИМ [7, 17].

Проверка влияния квантования сигнала по амплитуде

Предположим, что мы используем восьмиразрядный ШИМ, имеющий 255 уровней выходного сигнала. Максимальный уровень управляющего сигнала – 1,24. Выполним моделирование прохождения сигнала управления через квантователи уровня и времени, чтобы сформировать модель цифрового управляющего сигнала [7, 17].

Модель преобразователя состоит из блоков работы с переменными рабочей области, квантователя по уровню (Quantizer) с разрешением 1,24/255 и квантователя по времени (Zero-OrderHold) с периодом квантования 0,0002 с (рис. 10).

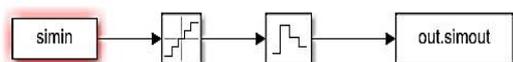


Рис. 10. Модель преобразователя

Время моделирования 0,1 секунды. Получаем сигнал в виде out структуры. Выделяем из структуры сигнала данные:

```
>> sig255=out.simout
```

Эта переменная является переменной типа TimeSeries [16] со структурой Events.

Для моделирования работы системы необходимо извлечь из нее массив данных, а затем построить зависимость (рис. 11):

```
>> sig255m=sig255.Data;
>>figure(3),lsim(h,sig255m',ts)
```

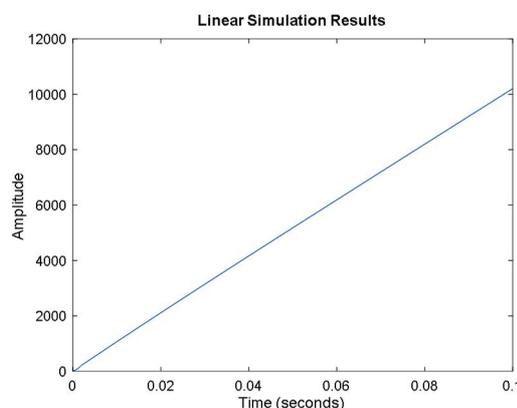


Рис. 11. График управляющего сигнала при моделировании

С учетом параметров формирования управляющего сигнала можно с уверенностью сказать, что реализация программного пуска системы с постоянным ускорением может быть выполнена на большинстве 8-разрядных микроконтроллеров.

Способ выхода в стационарный режим работы с постоянной скоростью

Необходимость такого анализа вызвана требованием к линейности закона управления и, одновременно, обеспечением высоких ускорений центрифуги. Для сохранения времени разгона на требуемом уровне управляющий сигнал при подходе к точке выхода на стационарный режим работы вышел на уровень 1,24, что на 0,24 выше стационарного режима. Посмотрим, как будет выглядеть переход при скачкообразном сбросе уровня управляющего сигнала до номинального значения (рис. 12).

Увеличим временной интервал исследования до 0,15 секунд.

```
>>tsl=0:0.0002:0.15;size(tsl)
ans =
751
```

Таким образом, к массиву значения управляющего сигнала необходимо добавить 250 точек.

```
>>sigm=zeros(1,501);
>>sigml=[sigmdop];
>>figure(1),plot(sigml),shg
```

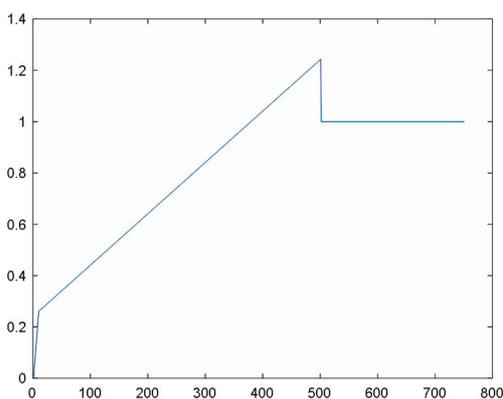


Рис. 12. Управляющий сигнал при скачкообразном сбросе уровня установившегося значения до номинального

Далее рассчитаем выходную характеристику (рис. 13).

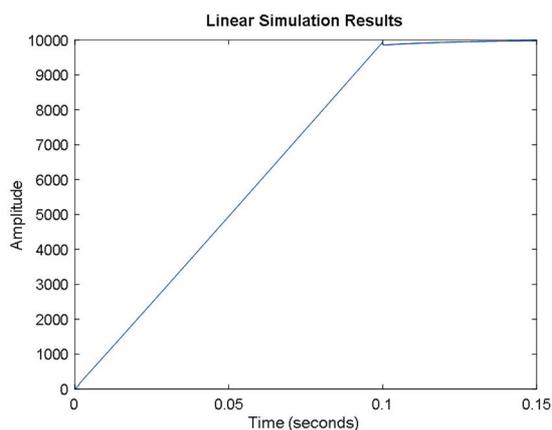


Рис. 13. Выходная характеристика при скачкообразном сбросе уровня управляющего сигнала

Как видно из результата (рис. 13), сброс уровня управляющего сигнала вызвал небольшой, но резкий спад скорости, что также недопустимо.

Введем в характеристику небольшой линейный спад управления:

```
>>dop(1)=1.24;for i=2:10,dop(i)=dop(i-1)-0.024;end
```

Посмотрим результирующую характеристику (рис. 14).

Выходной сигнал системы при данных условиях (рис. 15):

```
>>figure(3),lsim(h,sigml',h1),shg
```

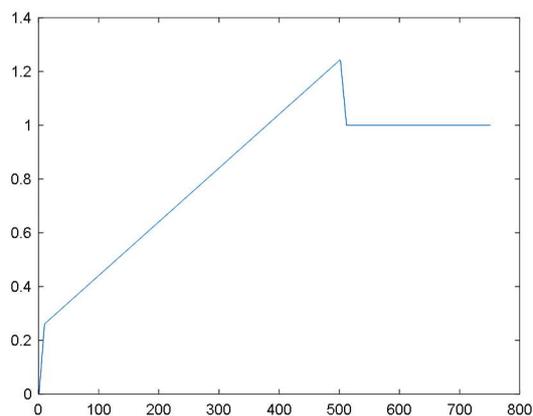


Рис. 14. Результирующая характеристика при линейном спаде

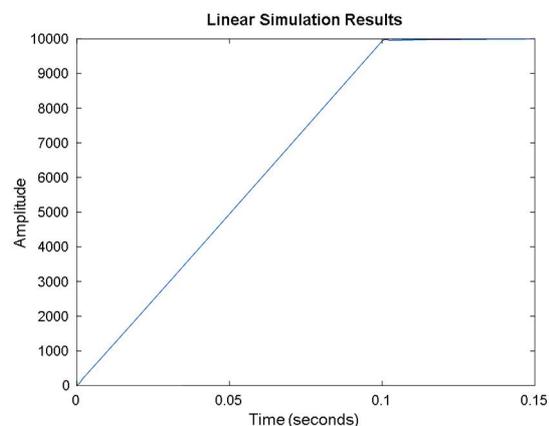


Рис. 15. Выходной сигнал при данных условиях

Участок линейного спада управляющего сигнала вносит сглаживание в зону выхода на стационарный режим работы и, при необходимости, может быть скорректирован по длительности и амплитуде.

Таким образом, разработаны основы методики построения быстродействующего микропроцессорного регулятора системы автоматического управления центрифуги, отличающейся подходом к выбору вида преобразования передаточной функции, обеспечивающим простой алгоритм формирования управляющего сигнала объекта управления.

Заключение

Требуемый закон изменения выходной величины системы автоматического управления часто определяется свойствами регулятора, выбор которых определяющим образом влияет на качество технологического процесса и основные потребительские характеристики автоматизированного оборудования [7].

При моделировании дискретного регулятора значение периода квантования по времени должно быть больше или равно значению времени выборки, которое указывается при вводе величин в блоке дискретной трансфер-функции. При несоблюдении данного условия регулятор потеряет свои свойства.

При моделировании дискретных регуляторов использование Z-преобразования можно заменить экстраполятором нулевого порядка. Такой приём на порядок сократит время, затрачиваемое на вычисления, и необходимость вычислений с дискретностью микроконтроллера [4, 7]. При этом нужно указать значение периода квантования в задающей области экстраполятора, которое было указано у дискретного регулятора.

Для получения функций, описывающих закон изменения скорости центрифуги, наилучшие результаты дал метод наименьших квадратов.

С учетом параметров формирования управляющего сигнала можно с уверенностью сказать, что реализация программного пуска системы с постоянным ускорением может быть выполнена на большинстве 8-разрядных микроконтроллеров.

Участок линейного спада управляющего сигнала вносит сглаживание в зону выхода на стационарный режим работы и, при необходимости, может быть скорректирован по длительности и амплитуде.

Создана новая методика построения быстродействующего микропроцессорного регулятора системы автоматического управления, отличающаяся подходами к выбору средств преобразования передаточной функции.

Литература

1. Анненков А.Н., Белоусова О.В., Шиянов А.И. Разработка автоматической установки нанесения фоторезиста // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. Т.17. №3 (65). С. 55-65.
2. Анненков А.Н., Белоусова О.В. Анализ автоматизированной установки нанесения фоторезиста как объекта управления // Вестник ТГТУ. 2022. Т.28. №2. С. 214-225.
3. Белоусова О.В. Особенности программирования микропроцессорных регуляторов в MATLAB// Электроэнергетика и электротехника: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. / отв. ред. д-р техн. наук, доц., зав. каф. электротехники А.Н. Анненков. Воронеж: НОУ ВПО «Междунар. ин-т компьют. технологий», 2018. С. 36-39
4. Сачавец О.В., Слепокуров Ю.С. Моделирование микропроцессорных регуляторов// Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы науч.-техн. конф. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. – С. 44-52
5. Анненков А.Н., Белоусова О.В. Разработка программного обеспечения автоматизированной установки нанесения фоторезиста // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т.18. №3. С. 18-29.
6. Анненков А.Н., Белоусова О.В. Развитие моделей и алгоритмического обеспечения системы управления установки нанесения фоторезиста // Информационные системы и технологии. 2022. №4 (132). С. 60 - 68.
7. Сачавец О.В., Слепокуров Ю.С. Моделирование дискретных регуляторов систем автоматического управления// Вычислительные машины, автоматика и робототехника: материалы науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. С. 74-82
8. Данилов А.М., Гарькина И.А. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем: монография. Пенза: ПГУАС, 2014. 168 с. ISBN 978-5-9282-1036-6
9. Компания PromElectrica. Каталог. Энкодеры [сайт]. URL: https://promelectrica.ru/catalog/raznoe/work_new/e20s2/e20s2_100_3_n_5_r_a2500002005/ (Дата обращения: 22.10.2022)
10. Малышева Т.А. Численные методы и компьютерное моделирование. Лабораторный практикум по аппроксимации функций: учеб.-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 33 с.
11. Чье Ен Ун, Шеин А.Б. Интерполирование функций для задач моделирования электронных устройств. Ч. I // Информатика и системы управления. 2014. № 2(40). С. 33-38.
12. Чье Ен Ун, Шеин А.Б. Интерполирование функций для задач моделирования электронных устройств. Ч. II // Информатика и системы управления. 2014. № 3(41). С. 39-46.
13. Dr. Bob Davidov. SystemIdentificationToolkit. [Электронный ресурс]. URL: https://portalnp.snauka.ru/wp-content/uploads/2013/11/03.01_System-Identification-Toolbox_Ed_2a.pdf?vsclid=I9jv0vs05b644493217 (Дата обращения: 22.10.2022)
14. Мельник А.А., Медунова Е.А. Построение моделей с применением пакета SystemIdentificationToolbox матричной лаборатории matlab+simulink // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование №3 (47) 2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-modeley-s-primeneniem-paketa-system-identification-toolbox-matrichnoy-laboratorii-matlab-simulink/viewer> (Дата обращения: 22.10.2022)
15. Лоссов К.И., Маркарян Е.Г. Преобразования Фурье и Лапласа: метод. указания. М.: МИИГАиК, 2017. 68 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.miiigaik.ru/upload/iblock/b78/b78ca9f412a932682781924663c5bbe9.pdf?vsclid=I9jw2ulzoc386094227> (Дата обращения: 22.10.2022)

16. Слепокуров Ю.С. Диалоговый режим работы с пакетом SystemIdentificationToolbox// Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы науч.-техн. конф. Воронеж: ВГТУ, 2002. С. 35 – 41.

17. Сачавец О.В., Слепокуров Ю.С. Программирование микропроцессорных регуляторов в Matlab 7.5//

Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы науч.-техн. конф. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. С. 41-44.

Поступила 20.10.2022; принята к публикации 15.12.2022

Информация об авторах

Анненков Андрей Николаевич - д-р техн. наук, доцент, проректор по научной работе, Международный институт компьютерных технологий (394026, г. Воронеж, ул. Солнечная, 29 б), e-mail: annenkovandray@yandex.ru, тел.: +7(473) 233-11-93; 8951-870-37-77, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1914-8075>

Белусова Олеся Владимировна - старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика», Международный институт компьютерных технологий (394026, г. Воронеж, ул. Солнечная, 29 б), e-mail: sova.ol@mail.ru, тел.: +7(473)239-25-96; 89081328759

PROCEDURE FOR CONSTRUCTING FAST MICROPROCESSOR CENTRIFUGE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM REGULATOR WITH SPECIAL TYPE OF TRANSFER FUNCTION CONVERSION

A.N. Annenkov, O.V. Belousova

International Institute of Computer Technology, Voronezh, Russia

Abstract: the choice of the regulator of the automatic control system is determined by the requirements to the law of change of the specified value, the nature of which, in a determining way, affects the quality of the technological process and the main consumer characteristics of the equipment. With the help of mathematical packets, it is possible to obtain a Z-transformed transfer function of the regulator at a certain value of the quantization period. Rounding the coefficients of the Z-function even in the third or fourth sign in high-speed systems leads to the loss of its statistical properties by the regulator, which creates certain difficulties when implementing a discrete model.

When simulating a discrete regulator, the value of the quantization period in time should be greater than or equal to the sampling time value, which is indicated when entering values in the unit of the discrete transfer function. If this condition is not met, the regulator will lose its properties. When simulating discrete regulators that use Z-transformations, they are replaced by a zero-order extrapolator. This technique significantly reduces computation time and eliminates the need for microcontroller discreteness calculations.

To obtain functions describing the law of change in the centrifuge speed, the least squares method gave the best results. The linear decay section of the control signal introduces smoothing into the zone of exit to the stationary mode of operation and, if necessary, can be corrected for duration and amplitude. Taking into account the parameters of the control signal generation, it can be said that the implementation of the program start of the system with constant acceleration can be performed on most 8-bit microcontrollers.

The work describes the basics of a new technique for constructing a fast-acting microprocessor controller of an automatic control system, which differs in approaches to selecting transfer function conversion means

Key words: automatic control system, process quality, regulator transfer function, fast-acting objects, discrete model, approximation, centrifuge speed law, least squares method, control signal synthesis, equivalent forward-exact function, direct and inverse Laplace transformation method

References

1. Annenkov A.N., Belousova O.V., Shiyonov A.I. "Development of an automatic photoresist application unit", *News of Higher Educational Institutions of the Black Earth Region (Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozem'ya)*, 2021, vol.17, no.3 (65), pp. 55-65.
2. Annenkov A.N., Belousova O.V. "Analysis of the automated photoresist application unit as a control object", *Bulletin of TSTU (Vestnik TGTU)*, 2022, vol. 28, no. 2, pp. 214-225.
3. Belousova O.V. "Features of programming microprocessor regulators in MATLAB", *Proc. of the Int. Sci. and Tech. Conf.: Electric Power and Electrical Engineering (Elektroenergetika i elektrotehnika)*, Voronezh, 2018, pp. 36-39
4. Sachavets O.V., Slepokurov Yu.S. "Modeling of microprocessor regulators", *Proc. of Sci. and Tech. Conf.: Automation and Robotization of Technological Processes (Avtomatizatsiya i robotizatsiya tekhnologicheskikh protsessov)*, Voronezh, 2007, pp. 44-52
5. Annenkov A.N., Belousova O.V. "Development of software for an automated photoresist application unit", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol.18, no. 3, no. 18-29.

6. Annenkov A.N., Belousova O.V. "Development of models and algorithmic support for the control system of the photoresist application plant", *Information Systems and Technologies of OSU named after I.S. Turgenev (Informatsionnyye sistemy i tekhnologii FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva»)*, 2022, no. 4 (132), pp. 60 - 68.
7. Sachavets O.V., Slepokurov Yu.S. "Modeling of discrete regulators of automatic control systems", *Proc. of Sci. and Tech. Conf. for Students and Young Scholars: Computers, Automation and Robotics (Vychislitel'nyye mashiny, avtomatika i robototekhnika)*, Voronezh, 2007, pp. 74-82
8. Danilov A.M., Garkina I.A. "Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems" ("Interpolyatsiya, approksimatsiya, optimizatsiya: analiz i sintez slozhnykh sistem"), monograph, Penza: PGUAS, 2014, 168 p. ISBN 978-5-9282-1036-6
9. PromElectrica. Catalog. Encoders, available at : https://promelectrica.ru/catalog/raznoe/work_new/e20s2/e20s2_100_3_n_5_r_a2500002005 (date of access: 22.10.2022)
10. Malysheva T.A. "Numerical methods and computer modeling", *Laboratory Workshop on Function Approximation (Laboratornyy praktikum po approksimatsii funktsiy)*, textbook, St. Petersburg: ITMO University, 2016, 33 p.
11. Chie Yong Un, Shein A.B. "Interpolation of functions for electronic device modeling tasks. Part I", *Informatics and Control Systems (Informatika i sistemy upravleniya)*, 2014, no. 2(40), pp. 33-38.
12. Chie Yong Un, Shein A.B. "Interpolation of functions for electronic device modeling tasks. Part II", *Informatics and Control Systems (Informatika i sistemy upravleniya)*, 2014, no. 3(41), pp. 39-46.
13. Davidov B. "System Identification Toolkit", available at: https://portalnp.snauka.ru/wp-content/uploads/2013/11/03.01_System-Identification-Toolbox_Ed_2a.pdf?ysclid=19jv0vs05b644493217 (date of access: 22.10.2022)
14. Miller A.A., Medunova E.A. "Building models using the System Identification Toolbox package of the matlab + simulink matrix laboratory", *Modern Technologies. System Analysis. Simulation (Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie)*, 2015, no. 3 (47), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-modeley-s-primeneniem-paketa-system-identification-toolbox-matrichnoy-laboratorii-matlab-simulink/viewer> (date of access: 22.10.2022)
15. Lossov K.I., Markaryan E.G. "Fourier and Laplace transformations: methodological instructions", Moscow: MIIGAiK, 2017, 68 p. available at: <https://www.miigaik.ru/upload/iblock/b78/b78ca9f412a932682781924663c5bbe9.pdf?ysclid=19jw2ulzoc386094227> (date of access: 22.10.2022)
16. Slepokurov Yu.S. "Dialog mode of operation with the System Identification Toolbox. Automation and robotization of technological processes", *Materials of the Sci. and Tech. Conf. in Voronezh, November 11-12, 2002, VSTU. 2002*, pp. 35-41
17. Sachavets O.V., Slepokurov Yu.S. "Microprocessor controller programming in Matlab 7.5", *Proc. of Sci. and Tech. Conf.: Automation and Robotization of Technological Processes (Avtomatizatsiya i robotizatsiya tekhnologicheskikh protsessov)*, Voronezh, 2007, pp. 41-44.

Submitted 20.10.2022; revised 15.12.2022

Information about the authors

Andrey N. Annenkov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Vice-Rector for Research, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya st., Voronezh 394026, Russia), e-mail: annenkovandray@yandex.ru, tel.: +7(473) 233-111- 93; +7951-870-37-77, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1914-8075>

Olesya V. Belousova, Assistant Professor, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya st., Voronezh 394026, Russia), e-mail: sova.ol@mail.ru, tel.: +7(473) 239-25-96; +79081328759

ЕСТЕСТВЕННАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ КОНВЕКЦИЯ НЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В КВАДРАТНОЙ КАВЕРНЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ ЧЕРЕЗ «СМОЧЕННЫЕ» ПОВЕРХНОСТИ

В.И. Ряжских¹, В.А. Сумин²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: на основании уравнений Обербека-Буссинеска синтезирована математическая модель термической свободной конвекции в замкнутой квадратной камере с известным тепловым потоком через «смоченную» поверхность и отсутствием теплопритока через свободную поверхность. Выписана замкнутая система уравнений, описывающая процесс как в размерных, так и безразмерных величинах. Получена система уравнений в безразмерных величинах, несопряженный характер которой позволил разбить исходную задачу на две подзадачи: тепловую и гидротермическую. С помощью применения аппарата интегральных преобразований Фурье получено аналитическое решение этих подзадач. Показана динамика теплового и гидротермического процессов, возникающих в ньютоновской жидкости при нагревании в закрытой квадратной емкости с неидеальной теплоизоляцией. Вычислительный эксперимент показал, что в результате теплоподвода к жидкости образуются два вихря с вращением в разные стороны. При увеличении температуры на стенках жидкость поднимается вверх, и ниже оси происходит вращение против хода часовой стрелки, а выше оси – по ходу часовой стрелки, что соответствует известным физическим представлениям о движении жидкости в поле нагрева. С увеличением значений коэффициента Грасгофа значение максимума (минимума) функции тока увеличивается (уменьшается), тем самым математическая модель физически корректно описывает структуру температурного и гидротермического полей

Ключевые слова: ньютоновская жидкость, уравнение Обербека-Буссинеска, аналитическое решение, свободно-конвективное течение

Введение

Внутренние задачи свободноконвективного переноса при различных тепловых граничных условиях по-прежнему представляют научный и практический интерес в различных предметно-ориентированных областях [1,2]. Этой проблеме посвящены работы [3–5]. В отличие от предыдущих авторов, где задачи решались численно, в данной работе представлены аналитическое решение и анализ гидротермических полей криогенной жидкости при нагревании в закрытой квадратной емкости с неидеальной теплоизоляцией.

Выбор и обоснование формы и структуры математической модели

Задача определения характеристик при естественной термоконвекции ньютоновской жидкости формулируется в стоковском приближении [6]. Для этого рассматривается тестовая геометрия в виде квадратной камеры со стороной h . Пусть через «смоченную» поверхность поступает постоянный тепловой поток q , причем его величина мала, поэтому компо-

ненты скорости жидкости при свободноконвективном течении также можно считать малыми $|V_x| \ll 1$, $|V_y| \ll 1$. Тогда уравнения Обербека-Буссинеска записываются в виде [7]:

$$\rho \frac{\partial \bar{V}}{\partial \tau} = -\nabla p + \nu \Delta \bar{V} - \rho \beta (t - t_0) \bar{g}; \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \bar{V} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \Delta t, \quad (3)$$

где t_0 – начальная температура жидкости, ∇ – оператор Гамильтона, Δ – оператор Лапласа, $\bar{V}(V_x, V_y)$, p , t – вектор скорости, давление, температура; ρ , ν , a , β – плотность, кинематическая вязкость, коэффициент температуропроводности, коэффициент объемного расширения среды; τ – время; \bar{g} – вектор ускорения силы тяжести.

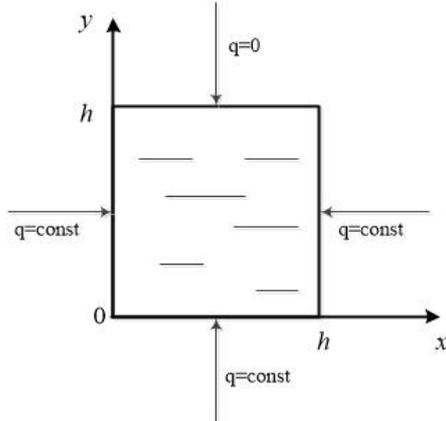


Рис. 1. Расчетная схема задачи

В компонентной форме записи система (1) – (3) такова:

$$\frac{\partial V_x(x, y, \tau)}{\partial \tau} = v \left[\frac{\partial^2 V_x(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_y(x, y, \tau)}{\partial \tau} = v \left[\frac{\partial^2 V_y(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right] + \beta g(t - t_0) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}; \quad (5)$$

$$V_x(x, y, 0) = V_y(x, y, 0) = 0; \quad (6)$$

$$V_x(0, y, \tau) = V_x(h, y, \tau) = 0; \quad (7)$$

$$V_x(x, 0, \tau) = \frac{\partial V_x(x, h, \tau)}{\partial y} = 0; \quad (8)$$

$$V_y(0, y, \tau) = V_y(h, y, \tau) = 0; \quad (9)$$

$$V_y(x, 0, \tau) = V_y(x, h, \tau) = 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial t(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 t(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right]; \quad (11)$$

$$t(x, y, 0) = t_0; \quad (12)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(0, y, \tau)}{\partial x} = q, \lambda \frac{\partial t(h, y, \tau)}{\partial x} = q; \quad (13)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(x, 0, \tau)}{\partial y} = q, \frac{\partial t(x, h, \tau)}{\partial y} = 0, \quad (14)$$

где x, y – декартовы координаты; λ – коэффициент теплопроводности среды.

Введением функции тока Ψ

$$V_x = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}; \quad V_y = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}$$

и относительных переменных $X = \frac{x}{h}, \quad Y = \frac{y}{h},$

$\theta = \frac{tv}{h^2}, \quad T = \frac{t\lambda}{qh}, \quad \text{Pr} = \frac{v}{a}$ – число Прандтля,

$\text{Gr}_\Gamma = \frac{\beta g q h^4}{v^2 \lambda}$ – число Грасгофа, система (5) – (14)

будет

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} \right) = \frac{\partial^4 \Psi}{\partial X^4} + 2 \frac{\partial^4 \Psi}{\partial X^2 \partial Y^2} + \frac{\partial^4 \Psi}{\partial Y^4} - \text{Gr}_\Gamma \frac{\partial T}{\partial X}; \quad (15)$$

$$\Psi(X, Y, 0) = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial \Psi(0, Y, \theta)}{\partial X} = \frac{\partial \Psi(1, Y, \theta)}{\partial X} = \frac{\partial \Psi(X, 0, \theta)}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \Psi(X, 1, \theta)}{\partial Y^2} = 0; \quad (17)$$

$$\Psi(0, Y, \theta) = \Psi(1, Y, \theta) = \Psi(X, 0, \theta) = \Psi(X, 1, \theta) = 0; \quad (18)$$

$$\frac{\partial T(X, Y, \theta)}{\partial \theta} = \frac{1}{\text{Pr}} \left[\frac{\partial^2 T(X, Y, \theta)}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T(X, Y, \theta)}{\partial Y^2} \right]; \quad (19)$$

$$T(X, Y, 0) = 0; \quad (20)$$

$$-\frac{\partial T(0, Y, \theta)}{\partial X} = -\frac{\partial T(X, 0, \theta)}{\partial Y} = \frac{\partial T(1, Y, \theta)}{\partial X} = 1; \quad (21)$$

$$\frac{\partial T(X, 1, \theta)}{\partial Y} = 0. \quad (22)$$

Решение модельной задачи

Несопряженный характер системы (15) – (22) позволяет отдельно использовать решение тепловой задачи при отыскании безразмерной функции тока Ψ из уравнения (15) с граничными и начальными условиями (16) – (18) при известном $\frac{\partial T}{\partial X}$.

Рассмотрим тепловую подзадачу, т.е. уравнения (19) – (22).

Введем замену

$$T(X, Y, \theta) = \Omega(X, Y, \theta) + X^2 - X + \frac{1}{2}(Y-1)^2, \quad (23)$$

которая переводит граничные условия (21) и (22) в однородные и становится

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \theta} = \frac{1}{\text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} + 3 \right); \quad (24)$$

$$\Omega(X, Y, 0) = - \left[X^2 - X + \frac{1}{2}(Y-1)^2 \right]; \quad (25)$$

$$\frac{\partial \Omega(0, Y, \theta)}{\partial X} = \frac{\partial \Omega(1, Y, \theta)}{\partial X} = 0; \quad (26)$$

$$\frac{\partial \Omega(X, 0, \theta)}{\partial Y} = \frac{\partial \Omega(X, 1, \theta)}{\partial Y} = 0, \quad (27)$$

а дополнительная замена

$$\Omega(X, Y, \theta) = \Gamma(X, Y, \theta) + \frac{3\theta}{\text{Pr}}, \quad (28)$$

трансформирует уравнение (24) в однородное, поэтому из (25) – (27) следует

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \theta} = \frac{1}{\text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial Y^2} \right); \quad (29)$$

$$\Gamma(X, Y, 0) = - \left[X^2 - X + \frac{1}{2}(Y-1)^2 \right]; \quad (30)$$

$$\frac{\partial \Gamma(0, Y, \theta)}{\partial X} = \frac{\partial \Gamma(1, Y, \theta)}{\partial X} = 0; \quad (31)$$

$$\frac{\partial \Gamma(X, 0, \theta)}{\partial Y} = \frac{\partial \Gamma(X, 1, \theta)}{\partial Y} = 0. \quad (32)$$

Для возможности применения аппарата конечных интегральных преобразований Фурье [8] к решению системы (29) – (32) преобразуем её к эквивалентному виду с помощью

специальных функций Хэвисайда $\mathbf{1}(X)$ и $\mathbf{1}(Y)$ [9]:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \theta} = \frac{1}{\text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial Y^2} \right); \quad (33)$$

$$\Gamma(X, Y, 0) = - \left[(X^2 - X) \cdot \mathbf{1}(Y) + \frac{1}{2} (Y - 1)^2 \cdot \mathbf{1}(X) \right]; \quad (34)$$

$$\frac{\partial \Gamma(0, Y, \theta)}{\partial X} = \frac{\partial \Gamma(1, Y, \theta)}{\partial X} = 0; \quad (35)$$

$$\frac{\partial \Gamma(X, 0, \theta)}{\partial Y} = \frac{\partial \Gamma(X, 1, \theta)}{\partial Y} = 0. \quad (36)$$

Функции $\mathbf{1}(X)$ и $\mathbf{1}(Y)$ разложимы в ряд Фурье по синусам, соответственно, на промежутке $X \in [0, 1]$ и $Y \in [0, 1]$, то есть

$$\mathbf{1}(X) = 2 \sum_{l=1}^{\infty} \left[-\frac{1}{\gamma_l} (\cos \gamma_l - 1) \right] \sin(\gamma_l X); \quad (37)$$

$$\mathbf{1}(Y) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \left[-\frac{1}{\varepsilon_k} (\cos \varepsilon_k - 1) \right] \sin(\varepsilon_k Y), \quad (38)$$

где $\gamma_l = \pi l$, $\varepsilon_k = \pi k$.

Применяя к (33) – (36) конечное интегральное преобразование Фурье по переменным X и Y

$$\begin{aligned} T(X, Y, \theta) &= X^2 - X + \frac{1}{2} (Y - 1)^2 + B_{00} \exp(C_{00} \theta) + \\ &+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} B_{0m} \exp(C_{0m} \theta) \cos(\mu_m Y) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_{n0} \exp(C_{n0} \theta) \times \\ &\times \cos(\mu_n Y) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_{n0} \exp(C_{n0} \theta) \cos(\lambda_n X) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_{n0} \times \\ &\times \exp(C_{n0} \theta) \cos(\lambda_n X) + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_{nm} \exp(C_{nm} \theta) \cos(\lambda_n X) \times \\ &\times \cos(\mu_m Y) + \frac{3\theta}{\text{Pr}}, \end{aligned} \quad (39)$$

где коэффициенты C_{00} , B_{0m} , C_{0m} , B_{nm} , C_{nm} определяются следующим образом

$$\begin{aligned} C_{nm} &= - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2 + \mu_m^2}{\text{Pr}}; \quad C_{n0} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n^2}{\text{Pr}}; \\ C_{0m} &= - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m^2}{\text{Pr}}; \quad C_{00} = 0; \\ B_{nm} &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\cos \varepsilon_k - 1)(\cos \lambda_n + 1)(1 - \cos \varepsilon_k \cos \mu_m)}{\lambda_n^2 (\varepsilon_k^2 - \mu_m^2)} + \\ &+ 2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(\cos \gamma_l - 1)(1 - \cos \gamma_l \cos \lambda_n)}{\mu_m^2 (\gamma_l^2 - \lambda_n^2)}; \\ B_{n0} &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} - \frac{(\cos \varepsilon_k - 1)^2 (\cos \lambda_n + 1)}{\lambda_n^2 \cdot \varepsilon_k^2} + \\ &+ 2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(\cos \gamma_l - 1)(1 - \cos \gamma_l \cos \lambda_n)}{3(\gamma_l^2 - \lambda_n^2)}; \\ B_{0m} &= 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} - \frac{(\cos \varepsilon_k - 1)(1 - \cos \varepsilon_k \cos \mu_m)}{6(\varepsilon_k^2 - \mu_m^2)} - \\ &- 2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{[\cos(\gamma_l \varepsilon) - 1]^2}{\gamma_l^2 \cdot \mu_m^2}. \end{aligned}$$

Подставляя (39) в (15), получим гидродинамическую задачу. Последовательно применяя синус преобразования Фурье по переменным X и Y , получим решение (15) – (18) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Psi(X, Y, \theta) &= 4 \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\xi_l^2 + \eta_k^2} \langle \xi_l [\cos(\xi_l) \cdot P_k - Q_k] \times \\ &\times M(\xi_l, \eta_k, \theta) - \eta_k \cdot F_l \cdot N(\xi_l, \eta_k, \theta) + \exp[-(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] \times \\ &\times \int_0^{\theta} \Phi(\theta) \cdot \exp[(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] d\theta \rangle \sin(\xi_l X) \sin(\eta_k Y), \end{aligned} \quad (40)$$

где

$$\begin{aligned} M(\xi_l, \eta_k, \theta) &= \frac{1 - \exp[-(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta]}{\xi_l^2 + \eta_k^2} - \\ &- \frac{\exp(-\eta_k^2 \theta) - \exp[-(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta]}{\xi_l^2}; \\ N(\xi_l, \eta_k, \theta) &= \frac{1 - \exp[-(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta]}{\xi_l^2 + \eta_k^2} - \\ &- \frac{\exp(-\xi_l^2 \theta) - \exp[-(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta]}{\eta_k^2}; \\ \int_0^{\theta} \Phi(\theta) \cdot \exp[(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] d\theta &= \text{Gr}_T \left\langle \frac{\cos \xi_l + 1}{\xi_l} \cdot \frac{\cos \eta_k - 1}{\eta_k} \times \right. \\ &\times \left\{ \frac{\exp[(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] - 1}{\xi_l^2 + \eta_k^2} \right\} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_{n0} \cdot \frac{\lambda_n}{\xi_l^2 + \eta_k^2 + C_{n0}} \times \\ &\times \left\{ \exp(C_{n0} \theta) - \exp[-(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] \right\} \times \\ &\times \frac{\xi_l \sin \lambda_n \cos \xi_l - \lambda_n \cos \lambda_n \sin \xi_l}{\lambda_n^2 - \xi_l^2} \cdot \frac{\cos \eta_k - 1}{\eta_k} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_{nm} \times \\ &\times \frac{\lambda_n}{\xi_l^2 + \eta_k^2 + C_{nm}} \cdot \left\{ \exp(C_{nm} \theta) - \exp[-(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] \right\} \times \\ &\times \left. \frac{\xi_l \sin \lambda_n \cos \xi_l - \lambda_n \cos \lambda_n \sin \xi_l}{\lambda_n^2 - \xi_l^2} \cdot \frac{\eta_k (1 - \cos \eta_k \cos \mu_m)}{\eta_k^2 - \mu_m^2} \right\rangle. \end{aligned}$$

Причем коэффициенты P_k , Q_k и F_l в выражении (40) находятся из системы уравнений, полученной после удовлетворения (40) граничным условиям (17) – (18):

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\xi_l}{\xi_l^2 + \eta_k^2} \{ [\xi_l \cos \xi_l \cdot P_k - Q_k] \cdot M(\xi_l, \eta_k, \theta) - \\ - \eta_k \cdot F_l \cdot N(\xi_l, \eta_k, \theta) - \\ - \exp[-(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] \cdot \int_0^{\theta} \Phi(\theta) \cdot \exp[(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] d\theta \} = 0; \\ \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\xi_l \cos \xi_l}{\xi_l^2 + \eta_k^2} \{ [\xi_l \cos \xi_l \cdot P_k - Q_k] \cdot M(\xi_l, \eta_k, \theta) - \\ - \eta_k \cdot F_l \cdot N(\xi_l, \eta_k, \theta) - \\ - \exp[-(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] \cdot \int_0^{\theta} \Phi(\theta) \cdot \exp[(\xi_l^2 + \eta_k^2)\theta] d\theta \} = 0; \\ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\eta_k}{\xi_l^2 + \eta_k^2} \{ [\xi_l \cos \xi_l \cdot P_k - Q_k] \cdot M(\xi_l, \eta_k, \theta) - \\ - \eta_k \cdot F_l \cdot N(\xi_l, \eta_k, \theta) - \end{aligned} \quad (41)$$

$$-\exp\left[-(\xi_j^2 + \eta_k^2)\theta\right] \cdot \int_0^\theta \Phi(\theta) \cdot \exp\left[(\xi_j^2 + \eta_k^2)\theta\right] d\theta = 0.$$

Верификация модели

Проанализируем решение тепловой задачи (23), (28). В начальный момент времени графики зависимости температуры от координат удовлетворяют условию (20) (рис. 2).

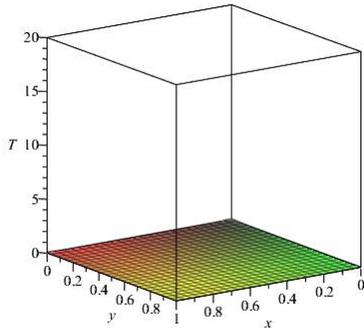
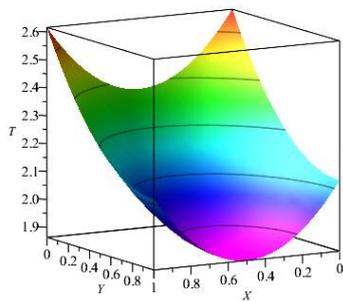
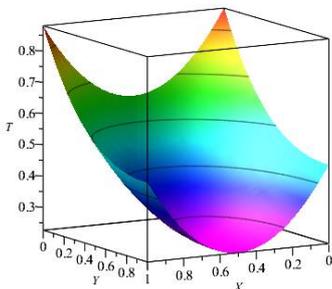


Рис. 2. Температурное поле при $\theta = 0$, $Pr = 0,7$



а

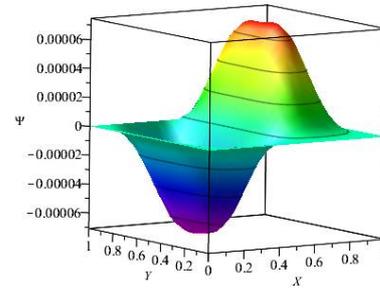


б

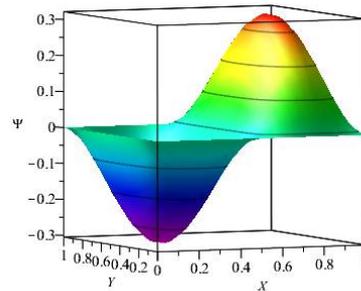
Рис. 3. Температурное поле при $Pr = 0,7$, для а – $\theta = 0,1$; б – $\theta = 0,5$

При увеличении числа Прандтля (рис. 3) температура уменьшается, что соответствует физическому смыслу задачи.

Решение (40) проиллюстрировано с помощью функции тока Ψ (рис. 4 – 5).

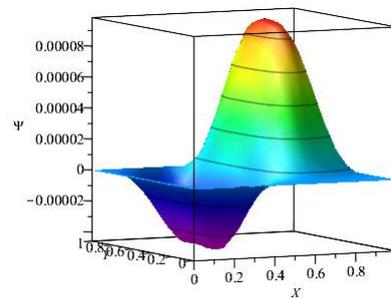


а

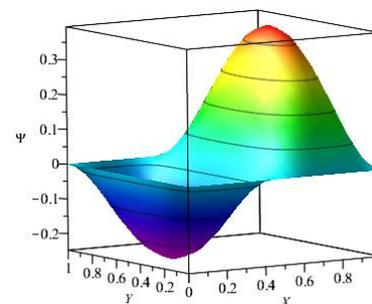


б

Рис. 4. Функция тока в камере при $\theta = 0,1$, $Pr = 0,7$ для а – $Gr_T = 1$, б – $Gr_T = 1000$



а



б

Рис. 5. Функция тока в камере при $\theta = 0,5$, $Pr = 0,7$ для а – $Gr_T = 1$, б – $Gr_T = 1000$

Анализируя графики, представленные на рис. 4–5, можно сделать следующие выводы:

В результате теплоподвода к жидкости образуются два вихря с вращением в разные сто-

роны. Движение жидкости вдоль линий тока связано с известным температурным полем [10]. При увеличении температуры на стенках жидкость поднимается вверх, и ниже оси Ψ происходит вращение против хода часовой стрелки, а выше оси – по ходу часовой стрелки. С увеличением значений теплового коэффициента Грасгофа (Gr_T) значение максимума (минимума) функции тока увеличивается (уменьшается), что говорит о корректности решения (40).

Выводы

Анализ показал, что математическая модель физически корректно описывает структуру температурного и гидродинамического полей. Причем интенсивность циркуляции жидкости возрастает, так как теплота аккумулируется в рассматриваемой области.

Литература

1. Никифоров А.С., Куличенко В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. М.: Энергостомиздат, 1985. 184 с.

2. Большов Л.А., Кондратенко П.С., Стрижов В.Ф. Свободная конвекция тепловыделяющей жидкости // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. №10. С. 1051–1070.

3. Ben-Cheikh N., Ben-Beya B., Lili T. Influence of thermal boundary conditions on natural convection in a square enclosure partially heated from below// Int. Commun. Heat Mass Transfer 34 (2007) 369–379.

4. Mobedi M., Ozkol U., Sunden B. Visualization of diffusion and convection heat transport in a square cavity with natural convection// Int. J. Heat Mass Transfer 53 (2010) 99–109.

5. Bagchi A., Kulacki F.A. Natural convection in fluid superposed porous layers heated locally from below// Int. J. Heat Mass Transfer 54 (2011) 3672–3682.

6. Лыков А.В., Берковский Б.М. Конвекция и тепловые волны. М.: "Энергия", 1974. 335 с.

7. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир, 1976. 630 с.

8. Снеддон И. Преобразования Фурье. М.: Изд-во Ин. лит-ры, 1955. 655с.

9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.

10. Рязских В.И., Сумин В.А. Теоретическая оценка влияния растворяющихся примесей в сжиженных газах на интенсивность перемешивания при их хранении в криогенных резервуарах// Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. №4(4). С. 35 – 42.

Поступила 28.09.2022; принята к публикации 15.12.2022

Информация об авторах

Рязских Виктор Иванович – д-р техн. наук, профессор, декан факультета машиностроения и аэрокосмической техники, заведующий кафедрой прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru

Сумин Виктор Александрович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Механика и компьютерное моделирование», Воронежский государственный университет (Россия, 394000, Университетская площадь 1), e-mail: vsum@rambler.ru

NATURAL THERMAL CONVECTION OF A NEWTONIAN FLUID IN A SQUARE CAVITY WITH A CONSTANT HEAT FLOW THROUGH "WETTED" SURFACES

V.I. Ryazhskikh¹, V.A. Sumin²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract: based on the Oberbeck-Boussinesq equations, we synthesized a mathematical model of thermal free convection in a closed square cavity with a known heat flow through the “wetted” surface and no heat inflow through the free surface. We wrote a closed system of equations that describes the process both in dimensional and dimensionless quantities. We obtained a system of equations in dimensionless quantities, the nonconjugate nature of which made it possible to split the original problem into two subproblems: thermal and hydrothermal. Using the apparatus of Fourier integral transformations, we obtained an analytical solution of these subproblems. We show the dynamics of thermal and hydrothermal processes that occur in a Newtonian fluid when heated in a closed square container with imperfect thermal insulation. The computational experiment showed that as a result of heat supply to the liquid, two vortices with rotation in different directions are formed. As the temperature on the walls increases, the liquid rises, and below the axis, it rotates counterclockwise, and above the axis, it rotates clockwise, which corresponds to the known physical concepts of the movement of a liquid in a heating field. With an increase in the values of the Grashof coefficient, the value of the maximum (minimum) of the stream function increases (decreases), thereby the mathematical model physically correctly describes the structure of the temperature and hydrothermal fields

Key words: newtonian fluid, Oberbeck-Boussinesq equation, analytical solution, free convective flow

References

1. Nikiforov A.S., Kulichenko V.V., Zhikharev M.I. "Neutralization of liquid radioactive waste" ("Obezvrezhivaniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov"), Moscow: Energostomizdat, 1985, 184 p.
2. Bol'shov L.A., Kondratenko P.S., Strizhov V.F. "Free convection of a heat-releasing liquid", *Achievements of Physical Sciences (Uspekhi fizicheskikh nauk)*, 2001, vol. 171, no.10, pp. 1051-1070.
3. Ben-Cheikh N., Ben-Beya B., Lili T. "Influence of thermal boundary conditions on natural convection in a square enclosure partially heated from below", *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 2007, no. 34, pp. 369–379.
4. Mobedi M., Ozkol U., Sunden B. "Visualization of diffusion and convection heat transport in a square cavity with natural convection", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2010, no. 53, pp. 99–109.
5. Bagchi A., Kulacki F.A. "Natural convection in fluid superposed porous layers heated locally from below", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2011, no. 54, pp. 3672– 3682.
6. Lykov A.V., Berkovskiy B.M. "Convection and heat waves" ("Konvektsiya i teplovye volny"), Moscow: Energiya, 1974, 335 p.
7. Happel J., Brenner G. "Hydrodynamics at small Reynolds numbers", Moscow: Mir, 1976, 630 p.
8. Sneddon I. "Fourier transforms", Moscow: Publishing House of the Institute of Literature, 1955, 655 p.
9. Korn G., Korn T. "Handbook of mathematics for scientists and engineers", Moscow: Nauka, 1973, 832 p.
10. Ryazhskikh V.I., Sumin V.A. "Theoretical assessment of the effect of dissolving impurities in liquefied gases on the mixing intensity during their storage in cryogenic tanks", *Aerospace Forces. Theory and Practice (Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika)*, 2017, no. 4(4), pp. 35-42.

Submitted 28.09.2022; revised 15.12.2022

Information about the authors

Viktor I. Ryazhskikh, Dr. Sc. (Technical), Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering and Aerospace Engineering, Head of the Department of Applied Mathematics and Mechanics, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru

Viktor A. Sumin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State University (1 University Square, Voronezh 394000, Russia), e-mail: vsum@rambler.ru.

СТРУКТУРА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Г.В. Петрухнова, И.Р. Болдырев, М.Г. Усачев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: обоснована актуальность задач создания и совершенствования средств измерения и контроля состояния технических объектов. Указано на существование в метрологии трех родов информационных операций: восприятие, воспроизведение и переработка, и только восьми разновидностей операций восприятия и такого же числа операций воспроизведения. Представлены канонические операции восприятия и воспроизведения, а также соответствующие им характеристики и экспериментальные информационные операции. Представлена модель объекта контроля. Для количественных и качественных характеристик информационных операций приведены примеры соответствующих потребительских информационных операций. Согласно проведенной классификации информационных операций, разработана структура многофункциональной системы сбора данных для контроля состояния технических объектов. Данная система предназначена для реализации информационных операций «контроль» и «контрольное испытание». Многофункциональная система сбора данных (МССД) служит для повышения компетентности обслуживающего персонала при работе с производственными ресурсами и для проведения контрольно-измерительных и ремонтных работ. При этом сами технические объекты могут иметь различную природу. В зависимости от природы технического объекта для его контроля могут потребоваться средства, отличные от тех, которые содержатся в составе МССД. Точечная заменяемость модулей МССД позволяет легко модернизировать систему и настроить ее на выполнение требуемых задач. Модульность МССД позволяет использовать ее и в качестве учебного стенда

Ключевые слова: система сбора данных, информационная операция, контроль, измерение, контрольное испытание, измерительное испытание, микроконтроллер, МССД

Введение

Задача создания и совершенствования средств измерения и контроля на сегодняшнем этапе развития общества является одной из важнейших, все в большей и большей степени определяющей развитие промышленного производства.

В настоящее время наблюдается взрыв информационных технологий (ИТ). В метрологии ИТ, по сути, означают операции восприятия, переработки и воспроизведения. Метрологический подход к информационным операциям развивается параллельно с развитием ИТ. Основной аспект при этом – развитие теоретических разработок и их внедрение в практику.

Проблемам измерения и контроля посвящен огромный поток публикаций, например [1] – [7]. Данная задача актуальна в различных приложениях, в таких областях как радиоэлектроника, физика, химия, медицина, автоматизация различных технологических процессов и др. Созданием и использованием измерительных систем занимаются большое число специалистов, и даже целые научные коллективы.

В общем случае подсистема сбора данных – это неотъемлемая часть измерительной си-

стемы. В настоящее время появилось много компактных высокочувствительных датчиков, используемых для сбора данных. Бурное развитие вычислительной техники сделало возможной оперативную обработку огромных массивов измерительной информации, благодаря чему сократился временной интервал между замыслом инженера – экспериментатора и осуществлением его замыслов.

Современные средства сбора информации актуальны на различных этапах их жизненного цикла. Одно из основных условий, повышающих эффективность и надежность функционирования технических объектов, является корректное проведение процедур контроля их состояния.

Распределенные системы сбора данных широко используются для технического контроля сложного оборудования [1] – [3]. В то же время востребованными являются и автономные системы сбора данных [4]. Их использование обусловлено необходимостью учитывать специфику объектов контроля при постановке и решении производственных задач.

Таким образом, различные по составу и конфигурации системы контроля содержат в своем составе подсистемы сбора информации. Для решения требуемых производственных задач системы сбора информации должны от-

личаться требуемой точностью, высокой надежностью и эффективностью.

Целью данной статьи является описание на основе классификации информационных операций архитектуры многофункциональной системы сбора данных (МССД), осуществляющей реализацию информационных операций «контроль» и «контрольное испытание» и служащей для повышения компетентности обслуживающего персонала при работе с производственными ресурсами.

Функционирование модулей МССД и самой системы в целом детально и достаточно полно представлено в работах [6], [7]. В данной статье описываются информационные операции, традиционно используемые в метрологии, и в этом ракурсе рассматривается структура МССД. Подход к изложению материала с точки зрения реализации ИО определяет новизну статьи и позволяет лучше представить структуру, функции и назначение МССД, а также показать многовариантность ее использования.

Постановка задачи

В статье [8] показано, что целенаправленные действия человека можно рассматривать в двух плоскостях – материи и информации. Традиционно в метрологии под ИО понимают именно информационные целенаправленные действия. Существует 3 рода ИО [8]: восприятие, воспроизведение и переработка. Исторически сложилась и используется система характеристик информации Темникова – Розенберга [8]: размер, пара “размер – размер” (функция), пара “размер – функция” (функционал), пара “функция – функция” (оператор). Не выходя за пределы шкалы наименования – для качественных характеристик, и шкалы количественных характеристик – для всех остальных, можно сделать вывод о существовании 8 разновидностей операций восприятия и 8 операций воспроизведения [5] (таблица). В таблице указаны канонические операции восприятия и воспроизведения, их характеристики и соответствующие экспериментальные ИО.

В таблице под измерительным испытанием (“измерение функции” по В.Я. Розенбергу [8]) понимается измерение мгновенных значений импульсных сигналов; под измерительным испытанием 1 (“измерение функционала”) – измерение параметров импульсных сигналов по ГОСТ 16465-70 [9]; измерительным испытанием 2 (“измерение оператора”) – определение

операторов динамических объектов по результатам экспериментов [8]. Любые другие ИО гомоморфны каноническим (таблица).

Реализация функций контроля технического объекта сводится к осуществлению определенных технологических операций. Представим модель объекта контроля в виде некоторого кортежа [5]:

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

где T – множество моментов времени для наблюдения за объектом; X, Y – множества входных и выходных сигналов соответственно; Z – множество состояний объекта; F – оператор переходов, отражающий реакцию объекта на внутренние и внешние возмущения; L – оператор выходов, описывающий механизм формирования выходного сигнала под воздействием различного рода возмущений.

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

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

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

Следующий этап моделирования процедуры контроля, мероприятий создания, испытаний или эксплуатации технического объекта – это постановка и решение задачи классификации [5]. Обобщенно решения этой задачи состоит в отыскании отображения η [5]:

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

где E – множество классов состояний объекта.

Задачу контроля можно обобщенно описать как [5]:

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

В статье рассматривается представление технических средств, позволяющих формировать множества X и Y в соответствии с каноническими ИО.

Примеры информационных операций

Будем рассматривать две шкалы значений: наименования – для качественных характеристик, и количественные характеристики – для всех остальных. Любой технологической операции, как части технологического процесса, соответствует информационная операция из представленных в таблице.

Рассмотрим количественные характеристики (таблица) и приведем соответствующие потребительские информационные операции. Информационная операция «измерение» (характеристика информации «размер») соотнобразывается с измерениями согласно МИ 2247-93 [9], оцифровкой качества, счетом, функцией часов, метрологической аттестацией средств

измерения, контроля и пр. Информационная операция «измерительное испытание» указывает на измерительное или определительное испытание по ГОСТ 16504-81 [10], климатическое испытание (температура, влажность), ис-

пытание изделий электронной техники по электрическим параметрам, метрологическую аттестацию средств контроля и др.

Характеристики канонических операций восприятия и воспроизведения

Характеристика информации	Значение характеристики информации	Экспериментальные ИО
Размер	Событие	Контроль, воспроизведение простого события
	Число	Измерение, воспроизведение числа
Функция	Функция события	Контрольное испытание, воспроизведение сложного события
	Числовая функция	Измерительное испытание, воспроизведение множества (двух) чисел
Функционал	«Функционал-событие»	Контрольное испытание 1, воспроизведение сложного события
	«Функционал-число» (функционал Эйлера-Лагранжа)	Измерительное испытание 1, воспроизведение множества чисел
Оператор	«Оператор функции события»	Контрольное испытание 2, воспроизведение сложного события
	«Оператор числовой функции» (оператор в функциональном пространстве)	Измерительное испытание 2, воспроизведение множества чисел

Операции «измерение функционала» и «измерение оператора» слабо изучены в метрологии. К ИО «измерение функционала» относится измерение параметров импульсного сигнала по ГОСТ 16465-70 [11]. ИО «измерение оператора» соответствует идентификация в технической кибернетике.

Рассмотрим качественные характеристики (таблица) и приведем соответствующие потребительские информационные операции. К информационной операции «контроль» можно отнести контроль по ГОСТ 16465-70 [11], радиотехническую фильтрацию, поверку и т.д. Информационная операция «контрольное испытание» соотносится с параметрическим контролем, функциональным контролем, технической диагностикой, приемочными испытаниями сложных изделий и пр. К информационной операции «контрольное испытание 1» можно отнести функции эталона, контрольного образца, источника питания, систем управления и др. Информационная операция «контрольное испытание 2» в метрологии слабо изучена.

Структура МССД с учетом выделенных информационных операций

Согласно проведенной классификации информационных операций разработана структура МССД [6]-[7] для контроля состояния технических объектов. Данная система предназначена для реализации информационных операций «контроль» и «контрольное испытание». Аппаратную часть МССД можно условно разграничить на две независимые группы, которые назовем как «А» и «Б».

Группа «А» состоит из модуля распределения напряжения, а также модуля питания и настройки. Модули группы «А» – это платы, допускающие независимую покомпонентную точечную замену. Эта часть МССД разработана для реализации ИО типа «контроль».

Модуль распределения напряжения предназначен для подачи питания на каждый модуль МССД. Он не только осуществляет распределение питания между всеми узлами МССД, но и позволяет проводить проверку работоспособности элементов питания.

Модуль питания и настройки предназначен для подачи питания на МССД и состоит из:

- распределителей напряжения между всеми модулями системы в диапазоне от 0 В до 12 В постоянного тока;
- независимых друг от друга элементов управления питанием;
- блока коммутирующих разъемов.

Модуль питания и настройки дают возможность и подать питание на различные элементы МССД. Этот модуль также может выполнять функции разветвителя.

Модуль питания и настройки представлен двумя регуляторами напряжения на базе переменных резисторов. Один из них регулирует напряжение от 0 до 12 В, второй – напряжение от 0 до 5 В. На практике широко используется напряжение номиналом 3,3 В. Поэтому имеется разъем, поддерживающий постоянное напряжение 3,3 В.

Этот модуль также содержит формирователь восходящих импульсов номиналом 3,3 В, появляющийся при нажатии на соответствующий контакт.

Также в состав модуля входит формирователь нисходящих импульсов 3,3 В с аналогичными функциями.

В состав группы «Б» входят следующие модули:

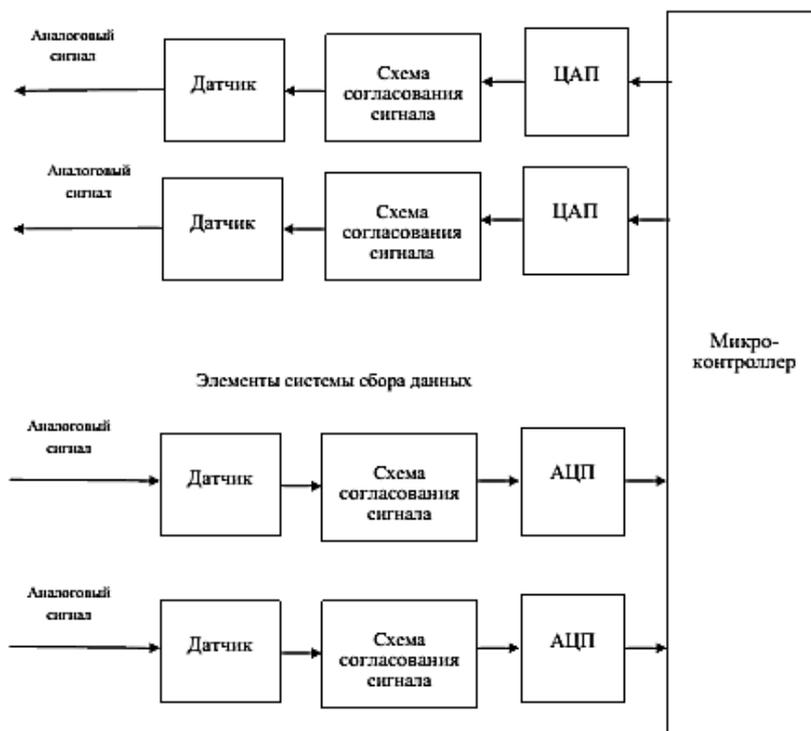
- модуль цифрового управления;
- модуль хранения, анализа данных и передачи их в управляющих компьютер.

С помощью модулей группы «Б» могут быть реализованы такие информационные операции, как «контрольное испытание» и, при условии модернизации МССД, «контрольное испытание 1».

Модуль центрального управления представляет собой ядро группы «Б». Его можно назвать ядром системы сбора данных. Основное назначение этого модуля состоит в реализации управления выбранными элементами (подключенными устройствами) с помощью МК STM32H743VIT6. На модуль поступает аналоговый сигнал, который оцифровывается с помощью АЦП, и далее оцифрованный сигнал в виде цифровой диаграммы выводится на дисплей компьютера, а также соответствующая информация записывается в БД.

На основе данного модуля может быть реализована АСУ, поскольку в его состав входят ЦАП и средства обратной связи с объектом.

Структура представленного модуля отображена на рисунке.



Модуль цифрового управления МССД

В состав модуля цифрового управления входят следующие устройства:

- 32-битный МК STM32H743VIT6, семейства ARM Cortex-M7 (частота до 400 МГц);
- 2 16-битных АЦП MCP33131D-110-E/MS;
- 2 измерительных усилителя ADA4254ACPZ-R7;
- 2 аналоговых мультиплектора DG409LEDQ-T1-GE3;
- 2 16-разрядных ЦАП DAC8552IDGKT;
- 2 операционных усилителя TLV9002IDGKR.

Система сбора данных представлена МК и схемами из нижней части рисунка [6]. Это 2 АЦП, 2 схемы согласования и датчики для снятия данных с объекта контроля. Выбор датчиков осуществляется исходя из задач, решаемых на основе МССД.

МССД – это установка, состоящая из плат, которые, по сути дела, реализуют функции представленных модулей. Замена этих плат происходит при необходимости модификации и модернизации системы. МССД может использоваться для автоматизации процессов контроля состояния технических объектов. При этом сами технические объекты могут иметь различную природу. В зависимости от природы объекта для его контроля могут потребоваться средства, отличные от тех, которые содержатся в составе МССД. Точечная заменяемость модулей позволяет легко модернизировать систему и настраивать ее на выполнение требуемых задач. МССД можно использовать в качестве учебного стенда для обучения будущих специалистов в областях вычислительной техники и радиоэлектроники.

Заключение

На данный момент задачи создания и совершенствования систем сбора информации определяют важнейшие направления развития как естественных наук, так и промышленного производства. Теория и техника проведения эксперимента оказались в центре «информационного взрыва». Созданием и использованием систем сбора данных занимается большое число специалистов. Бурное развитие вычислительной техники сделало возможной оперативную обработку огромных массивов измерительной информации.

В настоящее время большое распространение получило понятие «информационные технологии». В метрологии они, по сути, озна-

чают операции восприятия, переработки и воспроизведения.

В статье рассмотрены канонические операции восприятия и воспроизведения, а также соответствующие им характеристики и экспериментальные информационные операции. Множество других ИО вписывается в представленные канонические ИО.

Согласно проведенной классификации информационных операций разработана структура МССД для контроля состояния технических объектов. Данная система предназначена для реализации информационных операций «контроль» и «контрольное испытание». МССД может быть модернизирована для различных ИО.

В статье проанализирована структура МССД, выделены ее основные узлы и описано их назначение.

МССД может использоваться для создания АСУ процессами контроля состояния технических объектов, а также для проведения ремонтных работ. Она может применяться как стационарно, так и в рамках распределенной системы. Модульность МССД позволяет использовать ее в качестве учебного стенда. Легкая заменяемость модулей дает возможность использовать макет МССД для общения с заказчиком с целью учета его интересов по разработке устройств и производственных систем. Дальнейшая разработка этой системы позволит использовать ее в качестве распределенной автоматизированной системы сбора данных.

Литература

1. Фрейман В.И. К вопросу проектирования и реализации элементов и устройств распределенных информационно-управляющих систем // Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. №30. С. 28-49.
2. Freyman V., Posyagin A. The soft decoding of control systems elements test diagnostics results // Proceedings of 2017 XX IEEE international conference on soft computing and measurements (SCM). 2017. P. 329–332. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970576
3. Яблоков А.Е., Федоренко Б.Н., Латышев М.А. Технический мониторинг, диагностика и защита оборудования // Комбикорма. 2018. № 6. С. 32–34.
4. Современное состояние процессов автоматизации измерения и контроля/ Р.Т. Шабданбаева, Ж.Ж. Жанысбекова, Ж.Н. Исабеков, А.В. Шумаков // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций имени М. Тынышпаева. 2017. Вып. 103. № 4. С. 257-264. ISSN 1609-1817
5. Байкин В.А., Стецюк А.Н. Формализация технологических процедур контроля жизненного цикла сложной инженерно-технической системы // Программные

системы и вычислительные методы. 2016. №1(10). С. 52-58. DOI: 10.7256/2305-6061.2015.1.14407

6. Петрухнова Г.В., Болдырев И.Р. Многофункциональная система сбора данных для контроля состояния технических средств // Вестник Воронежского государственного университета. 2021. Т. 17. № 6. С.56-61.

7. Усачев М.Г., Болдырев И.Р., Петрухнова Г.В. Модули многофункциональной системы сбора данных для контроля состояния технических средств // Информационные технологии моделирования и управления. 2022. № 2. Т. 128. С. 134-137.

8. Бондаревский А.С. Информационные операции. Свойства. Применяемость свойств // Международный

журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. №10. С. 14-24.

9. МИ 2247-93. Рекомендации ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

10. ГОСТ 16504-81. Межгосударственный стандарт. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Термины и определения.

11. ГОСТ 16465-70. Межгосударственный стандарт. Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения.

Поступила 29.10.2022; принята к публикации 15.12.2022

Информация об авторах

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

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

Усачев Михаил Геннадьевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mikhail.usachev.2000@mail.ru

STRUCTURE OF MULTIFUNCTIONAL SYSTEM FOR MONITORING THE CONDITION OF TECHNICAL MEANS

G.V. Petrukhнова, I.R. Boldyrev, M.G. Usachev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we discuss the relevance of the tasks of creating and improving the means of measuring and monitoring the state of technical objects. We indicated that there are three kinds of information operations in metrology: perception, reproduction and processing, and only eight varieties of perception operations and the same number of reproduction operations. We present canonical operations of perception and reproduction, as well as their corresponding characteristics and corresponding experimental information operations. We present a model of the control object. For quantitative and qualitative characteristics of information operations, we give examples of relevant consumer information operations. According to the classification of information operations, we developed the structure of a multifunctional data collection system for monitoring the condition of technical facilities. We designed this system for the implementation of information operations "control" and "control test". The multifunctional data collection system (MDCS) serves to increase the competence of service personnel when working with production resources and for carrying out control, measurement and repair work. At the same time, the technical objects themselves may have a different nature. Depending on the nature of the technical object, means other than those contained in the MDCS may be used for its control. The point-to-point interchangeability of the MDCS modules makes it easy to upgrade the system and configure it to perform the required tasks. The modularity of the MDCS allows it to be used as a training stand.

Key words: data acquisition system, information operation, control, measurement, control test, measurement test, microcontroller, MDCS

References

1. Freyman V.I. "On the issue of design and implementation of elements and devices of distributed information and control systems", *Electrical Engineering, Information Technologies, Control Systems (Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya)*, 2019, no.30, pp. 28-49.
2. Freyman V.I., Bezukladnikov I.I. "The application of soft decision making on decoding and assessment of test diagnosing results within control systems elements", *Proc. of 2017 XX IEEE Int. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2017, pp. 124-128. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970515.
3. Yablokov A.E., Fedorenko B.N., Latyshev M.A. "Technical monitoring, diagnostics and equipment protection", *Compound Feed (Kombikorma)*, 2018, no. 6, pp. 32-34.
4. Shabdanbaeva R.T., Zhanysbekova Zh.Zh., Isabekov Zh. N., Shumakov A.V. "The current state of the processes of automation of measurement and control", *Bulletin of Kazakh Academy of Transport and Communications named after M. Tynyshpaev (Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsiy imeni M.Tynyshpayeva)*, vol. 103, no. 4, pp. 257-264. ISSN 1609-1817 2017

5. Baykin V.A., Stetsyuk A.N. "Formalization of technological procedures for monitoring the life cycle of a complex engineering system", *Program Systems and Computational Methods (Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody)*, 2016, no. 1(10), pp. 52-58. DOI: 10.7256/2305.
6. Petrukhnova G.V., Boldyrev I.R. "Multifunctional data collection system for monitoring the state of technical means", *Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 6, pp. 56-61.
7. Usachev M.G., Boldyrev I.R., Petrukhnova G.V. "Modules of a multifunctional data collection system for monitoring the state of technical means", *Information Technologies of Modeling and Control (Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2022, vol. 128, no. 2, pp. 134-137.
8. Bondarevskiy A.S. "Information operations. Properties. Applicability of properties", *Int. J. of Applied and Fundamental Research (Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy)*, 2017, no. 10, pp. 14-24.
9. MI 2247-93. "GSI recommendations. Metrology. Basic terms and definitions"
10. GOST 16504-81 "Interstate standard. The system of state testing of products. Testing and quality control of products. Terms and definitions"
11. GOST 16465-70 "Interstate standard. Radiotechnical measuring signals. Terms and definitions"

Submitted 29.10.2022; revised 15.12.2022

Information about the authors

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

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

Mikhail G. Usachev, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mikhail.usachev.2000@mail.ru

$t / (n - 1)$ -ВАРИАНТНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ

Д.В. Грузенкин, В.В. Едреев, Д.А. Пантелеев

Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий,
г. Красноярск, Россия

Аннотация: существуют такие сферы человеческой жизнедеятельности, где надёжность программного обеспечения важна критически для бесперебойной работы различного рода систем управления. Для повышения надёжности программного обеспечения существует множество подходов, в том числе основанных на программной избыточности. Среди них наиболее популярны, например, блоки восстановления и мультиверсионное программирование. Однако существуют и альтернативные подходы, значительно менее освещённые в литературе, например, $t/(n-1)$ -вариантное программирование. Хотя описание данного подхода представлено в публикациях очень скудно, он используется в научных работах и диссертациях для сравнения его эффективности с эффективностью алгоритмов голосования мультиверсионного программирования. Приведено общее описание и дополнительные разъяснения для подхода $t/(n-1)$, а также раскрыты моменты, упущенные в оригинальных статьях. Кроме того, на основании данного подхода был составлен алгоритм, который фактически не был описан в оригинальных статьях, разбор принципов его работы произведён на модельном примере. Представленный в статье алгоритм позволяет решать не только конкретные задачи, но и может быть применён к целому классу задач. Описан эксперимент, в котором сравнивается эффективность алгоритма на базе $t/(n-1)$ -вариантного программирования с алгоритмами голосования мультиверсионного программирования и подходом блоков восстановления. Приведены результаты эксперимента

Ключевые слова: $t/(n-1)$, надёжность программного обеспечения, программная избыточность, мультиверсионное программирование, блоки восстановления

Введение

Надёжность и отказоустойчивость программного обеспечения (ПО) – это одни из важнейших критериев оценки качества программного обеспечения [1]. Высокий уровень надёжности информационных систем крайне важен в тех сферах науки и техники, где от корректной работы ПО зависят жизнь и здоровье людей, а также в системах, где негативный эффект от возникновения одной ошибки может значительно превосходить весь полезный эффект от работы программного обеспечения за всё время функционирования. К областям, в которых высокая надёжность программного обеспечения (например, систем управления) важна критически, относятся: атомная энергетика, космические исследования, военное дело, авиастроение, химическая промышленность, железнодорожный транспорт и другие.

Для обеспечения высокого уровня надёжности и отказоустойчивости программного обеспечения было разработано множество подходов, основанных на разных видах избыточности (временная, информационная, программная) [2-4]. Хотя принцип введения избыточности в различного рода технические системы для

улучшения их характеристик сам по себе не нов, он перешёл в сферу программного обеспечения из аппаратной части вычислительных систем. Так, избыточность применяется, например, в работе систем специального математического обеспечения управления, как на аппаратном, так и на программном уровне [5].

На сегодняшний день можно сделать вывод, что наибольшей популярностью пользуются методы повышения надёжности программного обеспечения, основанные на программной избыточности, судя по количеству публикаций. К таким подходам и методам относятся, например, блоки восстановления и мультиверсионное программирование [6].

Мультиверсионный подход основан на введении избыточности в программное обеспечение. В основе подхода лежит идея о том, что сбои в различных версиях одного модуля независимы, а их появление происходит в разное время, поскольку версии имеют различия в реализации [7]. После выполнения всех версий модуля происходит выбор единственного ответа, который будет принят за ответ всего программного модуля. Выбор производится одним из алгоритмов голосования, например голосованием абсолютным или согласованным большинством. Поскольку сбои независимы и разнородны, даже в случае выхода из строя одной или нескольких (меньшинства) мультиверсий,

все остальные версии отработают верно, и модуль выдаст корректный результат [8]. Можно сказать, что мультиверсионное программирование является обобщением N -модульного резервирования.

При использовании модели блоков восстановления в каждую версию вводится модуль принятия решений. Если при выполнении первой версии обнаруживается ошибка, то будет вызвана восстанавливающая функция, которая возвращает систему в то состояние, которое было сохранено до выполнения первой версии. Затем выполняются и проверяются следующие версии, пока не будет найден верный ответ или пока не закончатся версии. Система возвращает ошибку, если ни одна версия не дала приемлемых результатов. Слабая сторона данного подхода в том, что он исключает возможность параллельного исполнения версий, а также обязывает разработчиков создавать проверочные тесты для каждой из версий [9].

Кроме упомянутых выше подходов к повышению надёжности ПО, которые достаточно подробно и практически всесторонне описаны во множестве научных публикаций, существует и гораздо менее известный подход – $t / (n - 1)$ -вариантное программирование [10, 11]. Однако при своём скудном освещении в публикациях данный подход уже неоднократно использовался в различных научных работах, в том числе в диссертациях, для сравнения его эффективности с эффективностью алгоритмов голосования в мультиверсионном программировании [12].

Такое положение дел, по мнению авторов, связано главным образом с отсутствием явно описанного алгоритма, которого нет в работах, описывающих подход $t / (n - 1)$ [10]. Демонстрация его работы и эффективности в статьях производится на конкретных примерах с ограниченным числом версий, без ясных и однозначных объяснений, как распространить описанный подход на систему с переменным числом версий [11].

Поскольку $t / (n - 1)$ -версионное программирование всё ещё применяется в научных исследованиях, целесообразно устранить описанные выше упущения и представить обобщённый алгоритм применения данного подхода, который может быть применён для решения класса реальных задач повышения надёжности

ПО. Выводу обобщённого алгоритма на основе частных примеров в имеющихся работах и посвящена данная статья.

Описание классического подхода $t/(n-1)$.

Постановка задачи

Общая схема $t / (n - 1)$ -вариантного подхода может выбрать корректное значение в качестве результата из множества результатов n версий при условии, что количество ненадёжных версий, возвративших некорректный ответ, в программном модуле не превышает t , это значит, что система из n версий является $t / (n - 1)$ -диагностируемой, если

$$n \geq 2t + 1 \quad (1)$$

то есть $t \leq \frac{n-1}{2}$ [10].

Последовательность действий при $t / (n - 1)$ -вариантном подходе, описанная в оригинальных статьях, приведена ниже.

1. Каждая из n независимо разработанных версий программного модуля выполняется параллельно.

2. Результаты некоторых, но не всех, формируют совокупность значений результатов испытаний для попарного сравнения.

3. Алгоритм принятия решения в рамках $t / (n - 1)$ -диагностики выполняет попарное сравнение всех отобранных для этого на предыдущем шаге выходов мультиверсий и выбирает предположительно корректный результат, который считается результатом всего модуля.

4. Если на шаге 3 не получен приемлемый результат, алгоритм добавляет набору сравниваемых выходов мультиверсий дополнительные значения, полученные от других мультиверсий модуля, если такие существуют, иначе – сигнализирует об исключении [11].

Далее приведён пример применения данного подхода в случае $n = 5$ и $t = 2$. Данная архитектура является $t / (n - 1)$ -диагностируемой. Для этого случая число низконадёжных версий не должно превышать двух, то есть $t \leq 2$. Если число версий окажется больше или равным трём ($n \geq 3$), а число допустимых ошибок так и останется равным двум, то алгоритм не сможет работать корректно.

Схематическое изображение архитектуры $t / (n - 1)$ -диагностируемого программного модуля при $n = 5$ и $t = 2$ приведено на рис. 1 [11].

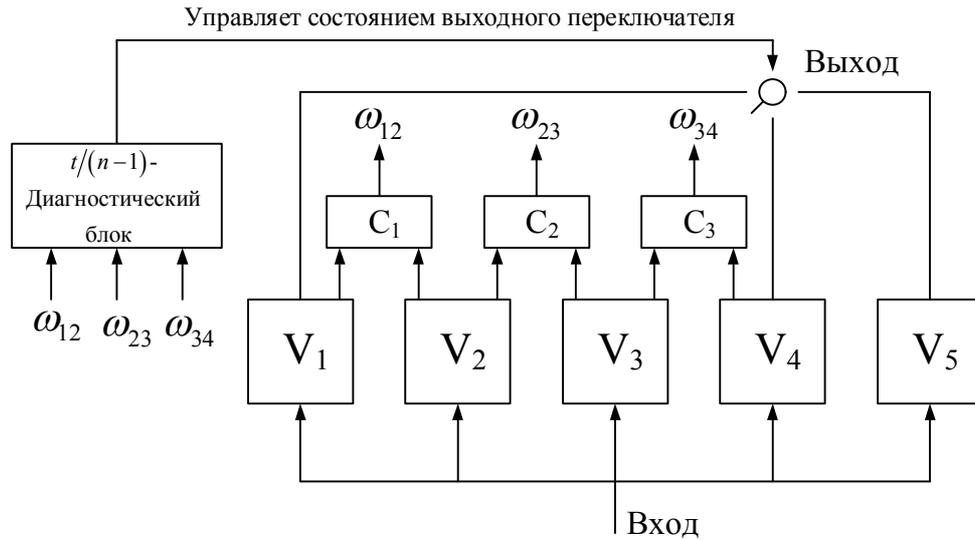


Рис. 1. Архитектура $t / (n-1)$ -вариантного программирования

V_i – i -я версия, C_j – j -й компаратор, $\omega_{i,i+1}$ – результат испытания, $i = \overline{1,5}$, $j = \overline{1,3}$.

Данная $2/(5-1)$ архитектура состоит из 5-ти независимо разработанных версий V_1, \dots, V_5 , которые выполняются параллельно в среде, предназначенной для устранения до 2 одновременных ошибок программного обеспечения. Три компаратора C_1, C_2, C_3 установлены на выходах V_1, V_2, V_3, V_4 для обнаружения ошибок. C_i сравнивает результаты V_i и V_{i+1} ($i = 1, 2, 3$) и подаёт на выход результат теста $\omega_{i,i+1}$, где

$$\omega_{i,j} = \gamma(V_i \text{ и } V_j \text{ расходятся}) \quad (2)$$

где $\gamma(\cdot)$ – индикаторная функция: $\gamma(true) = 1, \gamma(false) = 0$ [11].

Программа диагностики $t / (n-1)$ выбирает ответ одной из версий V_1, V_4, V_5 , в зависимости от значений $\omega_{1,2}, \omega_{2,3}, \omega_{3,4}$. Система выбора верного результата включает:

- 3 компаратора;
- $t / (n-1)$ -диагностический блок;
- выходной переключатель (выход) [11].

V_2 и V_3 не подключены к выходному переключателю, а V_5 не подключена к компаратору. Однако эта архитектура является $t / (n - 1)$ -диагностируемой для $t = 2$: диагностический блок всегда выбирает правильный ответ, если количество независимых ошибок и неисправностей ≤ 2 [11].

В табл. 1 приведены все возможные варианты результатов испытаний $\omega_{1,2}, \omega_{2,3}$, и $\omega_{3,4}$ соответствующие им предположительно вер-

ные результаты r_i (r_i – результат V_i), которые однозначно можно диагностировать как правильные для $t = 2$ [11].

Таблица 1

Возможные варианты выходов компараторов

№ строки	$\omega_{1,2}$	$\omega_{2,3}$	$\omega_{3,4}$	Предположительно верные результаты
1	0	0	0	r_1, r_2, r_3, r_4
2	0	0	1	r_1, r_2, r_3
3	0	1	0	r_5
4	0	1	1	r_1, r_2
5	1	0	0	r_2, r_3, r_4
6	1	0	1	r_5
7	1	1	0	r_3, r_4
8	1	1	1	r_5

Например, для $\omega_{1,2} = 1, \omega_{2,3} = 0, \omega_{3,4} = 1$ единственный правильный результат не может быть просто идентифицирован среди результатов, полученных от V_1, V_2, V_3, V_4 . Однако из совокупности результатов испытаний можно сделать вывод, что две или более из версий V_1, V_2, V_3, V_4 сгенерировали неправильные результаты, потому что одна единственная ошибка к такой совокупности значений привести не мо-

жет. Следовательно, результат V_5 должен быть правильным [11].

Для $\omega_{12} = \omega_{23} = \omega_{34} = 0$ либо все V_1, V_2, V_3, V_4 верны, либо все они не верны. По предыдущему предположению: $t = 2$, эти результаты следует классифицировать как приемлемые. Следуя аналогичному методу, мы можем проанализировать другие случаи, чтобы определить правильные результаты. Табл. 1 можно рассматривать как простой алгоритм диагностики для этого примера. Табл. 1 демонстрирует важный факт: как минимум один из r_1, r_4, r_5 должен быть правильным для данной совокупности значений выходных параметров. Соответственно, эта архитектура может выбирать правильный выход системы, выбирая только один из результатов, представленных версиями V_1, V_4, V_5 [11].

Преимущество $t / (n-1)$ -вариантного программирования заключается в том, что происходит выбор верного варианта ответа не из всех результатов работы версий, а из меньшего числа результатов. Данное преимущество наиболее ясно видно на моделях с большим количеством версий. Например, если происходит выбор из 9 ответов, то в случае использования алгоритмов голосования из мультиверсионного программирования затраты на их реализацию и исполнение окажутся выше, чем алгоритм выбора из меньшего числа ответов при использовании $t / (n-1)$ -вариантного программирования. Стоит отметить, что при уменьшении числа ответов, из которых происходит выбор, уменьшается сложность алгоритма выбора и увеличивается вероятность выбрать правильный ответ [11].

Число сравнений зависит от конкретной архитектуры. Например, для $n = 3$ и $t = 1$ для достоверной работы диагностического блока достаточно одного компаратора. Если два результата расходятся – выбирается результат третьей версии. Если результаты сходятся – они считаются правильными, и на выход поступает результат первой версии.

При увеличении n и t требуется более тщательное сопоставление результатов для достоверности работы $t / (n-1)$ -версионного подхода. Например, можно составить цепочки из результатов V_i и V_{i+1} , получаемых компараторами [10].

Приведённое выше описание с примерами модулей, состоящих из трёх и пяти версий, из работы [11] даёт довольно полное описание указанных случаев. Однако оно в явном виде не содержит однозначных ответов на следующие вопросы:

1. Как в общем случае определяется количество версий, результаты которых могут быть приняты за результат всего модуля?

2. Как в общем случае определяется количество выходов мультиверсий, подлежащих сравнению компараторами?

3. Результаты от каких именно версий будут подаваться на выход (между которыми будет делать выбор диагностический блок)?

4. По каким правилам производится выбор выхода диагностическим блоком (без перебора всех возможных вариантов выходов компараторов, как в табл. 1)?

5. Как и по каким критериям на шаге 4 приведённого алгоритма определяется, когда приемлемый результат не может быть получен?

Приведённые выше вопросы фактически являются постановкой задачи в данной работе. Ответам на них посвящён следующий раздел.

Методы исследования

В качестве методов исследования были использованы: индуктивный метод, позволяющий выводить общие правила из частных случаев их применения, и эмпирический метод исследований, предназначенный для получения знаний опытным путём.

Прежде чем переходить к описанию методов исследования, необходимо сделать уточнение, которое также явно и однозначно не проговаривается в оригинальной работе [10]. $t / (n-1)$ -вариантное программирование позволяет не просто производить сравнение выходов лишь некоторых версий, которые задействованы в алгоритме, но и задействовать в алгоритме не все версии модуля в случае соблюдения неравенства $n \geq 2t + 1$. Например, если модель состоит из 9 версий ($n = 9$), а ненадёжных версий, которые потенциально могут выдать ошибку 3 ($t = 3$), то для определения предположительно корректного ответа достаточно будет задействовать в алгоритме только 7 версий из 9. Именно об этом и говорится в четвёртом шаге описания алгоритма в предыдущем разделе: «Если на шаге 3 не получен приемлемый результат, алгоритм добавляет набору сравниваемых выходов мультиверсий дополнительные значения, полученные от других мультиверсий модуля, если такие существуют, иначе – сигнализирует об исключении». То есть, если в приведённом примере не удастся определить верный ответ по выходам семи версий, можно будет добавить ещё пару раз по одной версии и

довести число n до 9, при неизменном количестве ненадёжных версий.

Индуктивный метод исследования. Обобщение алгоритма

Итак, в ходе применения индукционного метода исследования были выявлены следующие закономерности, приведённые ниже.

При использовании алгоритма на модуле из пяти мультиверсий, две из которых потенциально ненадёжны, на выход модуля пойдёт значение одной из трёх мультиверсий, а для модуля из трёх мультиверсий – с одной ненадёжной, следовательно, значение одной из двух возможных версий будет принято за результат всего модуля. Таким образом, может быть сделан вывод, что число версий, результаты которых могут быть приняты за результат модуля (MRC , то есть Module Results Count), соответствует разности количества версий, участвующих в алгоритме (n), и количества потенциально ненадёжных версий (t), разумеется, при соблюдении неравенства (1):

$$MRC = n - t \quad (3)$$

Стоит отдельно отметить, что хотя и значение MRC во всех случаях считается одинаково по формуле (3), на практике может возникнуть ситуация, когда понадобится отправлять на выход модуля меньше значений мультиверсий чем $n - t$. Такая ситуация может возникнуть, когда $\left(\frac{n-1}{2}\right) - t > 0$. Подобный случай будет рассмотрен ниже.

Концепция того, что при использовании данного подхода всегда должна оставаться одна необрабатываемая альтернатива, отражена в его названии, поэтому количество выходов мультиверсий, подлежащих сравнению компараторами (CVC – Compared Versions Count), всегда на единицу меньше общего количества версий, задействованных в алгоритме:

$$CVC = n - 1 \quad (4)$$

В простейшем случае, когда $n = 3$, и $t = 1$, выход всего модуля будет выбираться из выходов первой и третьей версий, а когда $n = 5$ и $t = 2$, помимо первой и последней версий, свое значение на выход модуля может посылать и четвёртая версия. На первый взгляд можно сделать вывод, что на выход модуля (выходной переключатель) всегда отправляются значения первой и последней версий модуля, а также

значение последней из версий, участвующих в сравнении, если количество версий в модуле больше трёх. Однако это не совсем так.

При более тщательном анализе табл. 1 можно заметить, что в четвёртой и седьмой строках за верное значение принимается значение двух версий, ответы которых совпали между собой, что вполне логично, так как в данном случае модуль не может содержать более двух ненадёжных версий, следовательно, они уже были выявлены в ходе сравнения результатов, а версии, результаты работы которых совпали, совместно с версией 5 считаются отработавшими корректно. Поэтому на выход модуля пойдёт одна из двух указанных версий.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что от каждой подгруппы, состоящей из $MRC - 1$ сравниваемых версий, на выход (выходной переключатель) должна отправлять результат своей работы по меньшей мере одна версия, чтобы с помощью данного метода можно было находить не только группы совпадающих ответов, полученных от большей части сравниваемых мультиверсий, но и те группы совпадающих ответов, количество которых совместно с последней несравниваемой версией превышает общее количество ненадёжных версий.

Таким образом, помимо последней версии, не участвующей в сравнении, свои результаты на выходной переключатель должна отправлять каждая k -я версий, начиная с первой, где $k = 1, n - 1$ и изменяется с шагом

$$\frac{n-1}{MRC-1} \quad (5)$$

В случае получения дробного значения шага его необходимо округлить до ближайшего большего целого числа. В числителе и знаменателе отнимается единица, поскольку одна из версий не участвует в сравнении с другими, и её результат в любом случае идёт на выходной переключатель модуля.

Правило, по которому диагностическим блоком производится выбор ответа всего модуля, на основании всего вышесказанного может быть представлено в виде следующего алгоритма:

1. Если найдена единственная группа, где произошло совпадение результатов идущих подряд версий, и их количество больше количества ненадёжных версий в модуле (t), то результат, выданный данной группой версий, принимается за верный и поступает на выход всего модуля, от первой версии в этой группе, связанной с выходным переключателем. Иначе – переход к шагу 2.

2. Если найдена единственная группа версий размером t , где произошло совпадение результатов, причём $t = \frac{n-1}{2}$, то на выход всего модуля отправляется результат от первой версии в этой группе, связанной с выходным переключателем. Именно он будет считаться верным. Иначе – переход к шагу 3.

3. Если найдена одна группа версий размером t , где произошло совпадение результатов при $t < \frac{n-1}{2}$ или найдено несколько групп с одинаковым количеством версий, причём это количество не меньше t , то в качестве значения всего модуля будет использован результат последней мультиверсии, не подлежащей сравнению с остальными. Иначе – переход к шагу 4.

4. Если найдено несколько групп идущих подряд версий, ответы которых совпадают (группа может состоять и из одной версии), причём количество версий в этих группах меньше t , то выбор предположительно верного ответа считается несостоявшимся, поскольку нет возможности сравнить каждый результат с каждым для выявления общего количества одинаковых результатов, как в мультиверсионном подходе, и выявить группу ответов наибольшей численности, однако при попарном сравнении это невозможно, так как остаётся вероятность того, что в данном случае все версии выдали абсолютно разные ответы. Поэтому даже принятие результата последней несравнимой версии за результат всего модуля невозможно. При этом происходит переход к шагу 1 с включением ещё одной из имеющихся версий в состав анализируемых, если таковая имеется, в противном случае алгоритм завершает свою работу аварийно.

В пункте 4 приведён ответ на последний из вопросов, которые были поставлены ранее: «Как и по каким критериям на шаге 4 приведённого алгоритма определяется, когда приемлемый результат не может быть получен?».

Эмпирический метод исследования. Реализация алгоритма

В ходе применения эмпирического метода исследования были составлены несколько модельных примеров с разным количеством версий в модулях, а также написана программная реализация $t / (n - 1)$ -вариантного подхода на языке Python [13]. Кроме того, был проведён эксперимент, в ходе которого сравнивалась эффективность работы алгоритмов голосования мультиверсионного программного обеспечения, блоков восстановления и $t / (n - 1)$ -вариантного программирования.

Программа для проведения эксперимента состоит из нескольких модулей. Основная её задача – это формирование программных модулей и генерация их выходных данных, исходя из общих характеристик модуля и каждой входящей в него версии. Кроме этого, приложение запускает написанные также на Python алгоритмы голосования, которые объединены в отдельный пакет [13].

Результаты

В качестве результата применения индуктивного метода исследования были получены несколько модельных примеров систем $t / (n - 1)$ -вариантного программирования с различным числом версий. Для повышения понимания описанных выше моментов было принято решение привести один из таких примеров ниже.

Допустим, что дан модуль, состоящий из девяти версий, в котором присутствуют три потенциально ненадёжных версии, то есть $n = 9$, $t = 3$. Допустим, все его версии были выполнены и вернули какой-то результат. Теперь необходимо выяснить, выход какой версии будет принят за ответ всего модуля.

Исходя из соотношения n и t , для экономии вычислительных ресурсов целесообразно изначально запустить анализ выходов только семи версий, как показано на рис. 2. То есть изначально рассматривается тот случай, когда нестрогое неравенство (1) превращается в равенство.

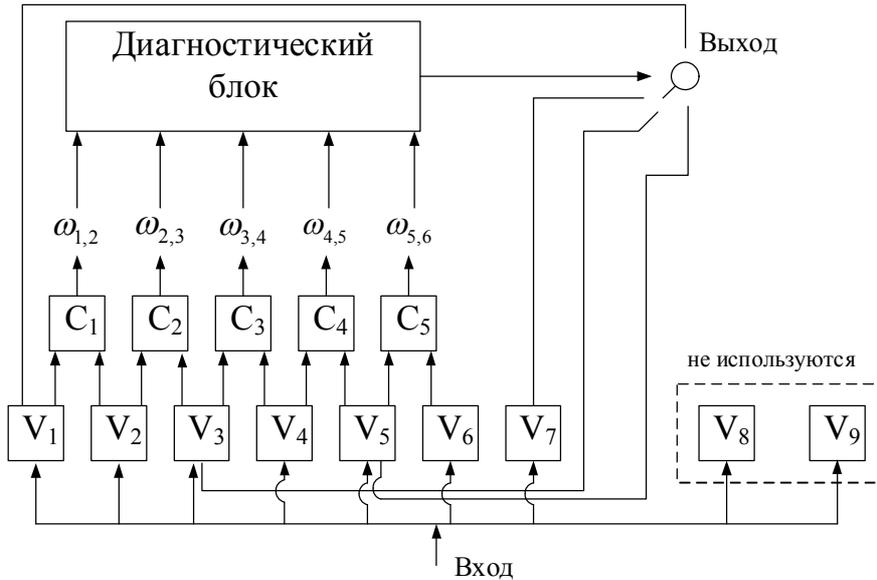


Рис. 2. Вариант структуры модуля при $n = 9, t = 3$ для применения $t / (n - 1)$ -вариантного программирования к 7 версиям

Как показано на рис. 2, на выход модуля поступают результаты от четырёх мультиверсий – это значение вычислено по формуле (3). Сравнению компараторами подлежат шесть из семи версий, как указано в формуле (4). На выходе модуля результат поступит либо от седьмой версии, либо от первой, третьей или пятой. Значение шага, то есть 2, было вычислено по формуле (5).

Допустим, все соседние версии выдали несогласованные результаты, то есть $\omega_{12} = \omega_{23} = \omega_{34} = \omega_{45} = \omega_{56} = 1$. В таком случае выбрать предположительно верный ответ не представляется возможным. Поэтому к набору анализируемых версий добавляется ещё одна,

из-за чего версии в составе модуля могут быть переупорядочены по какому-либо критерию.

После добавления ещё одной версии для анализа и их переупорядочивания в приводимом модельном примере меняется структура самого модуля. Теперь она выглядит как показано на рис. 3. В целом, структура практически такая же, как и на предыдущем рисунке, только увеличилось количество версий, результаты которых могут поступать на выход модуля. Шаг, с которым определяются индексы связанных с выходом модуля версий, также равен 2, хотя это значение теперь уже было получено путём округления.

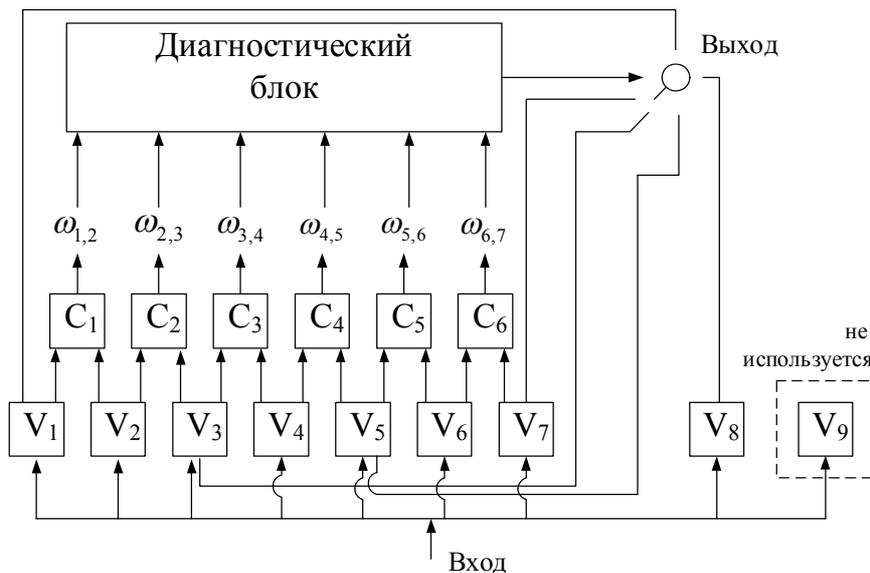


Рис. 3. Вариант структуры модуля при $n = 9, t = 3$ для применения $t / (n - 1)$ -вариантного программирования к 8 версиям

Допустим, на этот раз три пары мультиверсий выдали одинаковые результаты таким образом, что $\omega_{12} = \omega_{34} = \omega_{56} = 1$, а $\omega_{23} = \omega_{45} = \omega_{67} = 0$. Однако этого всё ещё недостаточно для принятия решения. Поэтому к числу анализируемых версий добавляется ещё одна (последняя из возможных).

После добавления ещё одной версии для анализа и их переупорядочивания в приводимом модельном примере меняется структура самого модуля. Теперь она выглядит, как показано на рис. 4. Стоит отметить, что вычисляемое по формуле (3) число версий, результаты

которых могут быть отправлены на выход, осталось равным пяти, поскольку значения шага, с которым сравниваемые попарно версии отправляются на выход, не изменилось после округления. Да и увеличение количества версий, которые могут отправлять свои результаты на выход всего модуля, является нежелательным, так как алгоритму принятия решения приходится делать выбор между всё большим количеством версий, что нивелирует преимущества данного подхода и приближает его к мультиверсионному программированию.

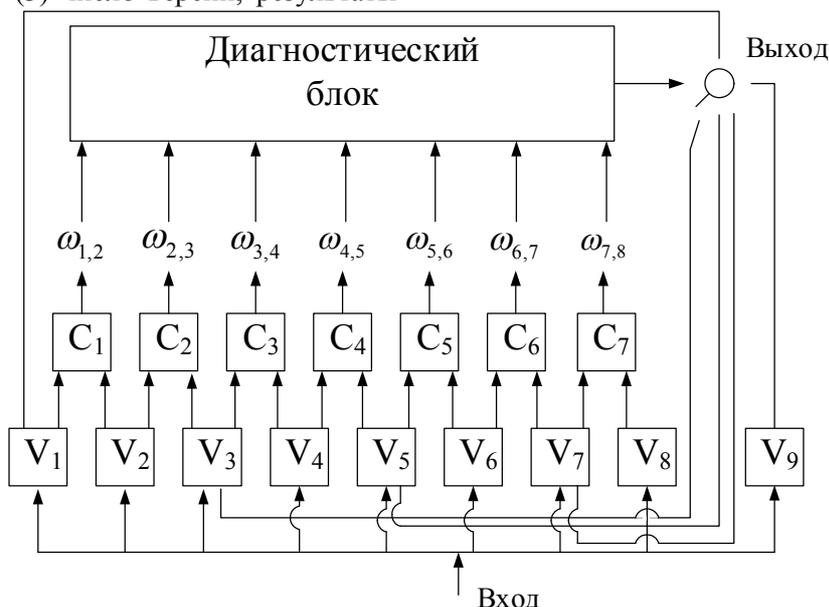


Рис. 4. Вариант структуры модуля при $n = 9, t = 3$ для применения $t / (n - 1)$ -вариантного программирования к 9 версиям

Допустим, в данном случае компараторы выдали следующие результаты: $\omega_{12} = \omega_{23} = \omega_{56} = \omega_{67} = 0$, $\omega_{34} = \omega_{45} = \omega_{78} = 1$. Таким образом, можно сделать вывод, что две группы версий, каждая из которых состоит из трёх версий, выдали согласованные результаты. Однако неясно, результат какой именно из этих групп может быть принят за конечный ответ модуля. Поэтому за результат работы всего модуля принимается результат последней, девятой версии.

Таким образом, был разобран один из случаев применения $t / (n - 1)$ -вариантного подхода, который позволил проиллюстрировать работу обобщённого алгоритма принятия решения, а также аспекты обобщённого формирования структуры модуля из n версий.

Для проведения же эксперимента были сформированы два программных модуля. В один из них вошло семь версий (в рамках данной работы он получает условное название

«М7»), в другой – девять (в рамках данной работы он получает условное название «М9»). Для запуска мультиверсионных алгоритмов голосования, а также алгоритма принятия решения $t / (n - 1)$ -вариантного подхода использовался соответствующий код на Python из [13]. Для сравнения результатов работы с результатами работы подхода блоков восстановления использовался SQL-запрос из [9], поскольку в этих работах структуры баз данных, где хранятся экспериментальные данные, идентичны.

В ходе проведения эксперимента для каждого из модулей было выполнено три серии запусков: по 100, 1000 и 10000 запусков в серии. Для сравнения с $t / (n - 1)$ -вариантным программированием были выбраны алгоритмы медианного голосования и голосования согласованным большинством мультиверсионного подхода, кроме того, в сравнении участвовала и методология блоков восстановления. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Результаты эксперимента

Алгоритм	Модуль	Кол-во запусков	Кол-во верных решений
$t / (n - 1)$	М7	10000	9996
Согласованное большинство			9998
Медианное голосование			9998
Блоки восстановления			9899
$t / (n - 1)$		1000	999
Согласованное большинство			1000
Медианное голосование			999
Блоки восстановления			991
$t / (n - 1)$		100	100
Согласованное большинство			100
Медианное голосование			100
Блоки восстановления			100
$t / (n - 1)$	М9	10000	10000
Согласованное большинство			9994
Медианное голосование			9996
Блоки восстановления			9902
$t / (n - 1)$		1000	1000
Согласованное большинство			1000
Медианное голосование			1000
Блоки восстановления			992
$t / (n - 1)$		100	100
Согласованное большинство			100
Медианное голосование			100
Блоки восстановления			100

Как видно из табл. 2, результаты применения $t / (n - 1)$ -вариантного подхода не только соизмеримы с результатами иных подходов, но и в некоторых случаях даже превосходят их.

Заключение

В заключении стоит отметить, что $t / (n - 1)$ -вариантный подход забыт незаслуженно, поскольку при устранении некоторых неопре-

делённостей, позволяющих применять этот подход для работы с произвольным количеством версий, он показывает свою практическую эффективность, что видно по приведённым результатам эксперимента.

Кроме этого, необходимо отметить, что приведённый модельный пример в разделе результатов является достаточно надуманным и нереалистичным, поскольку в некоторых описанных ситуациях может быть сделан вывод, что ненадёжных версий в модуле больше трёх. А это противоречит самой концепции $t / (n - 1)$ -вариантного программирования – считается, что число t заблаговременно точно известно. Однако этот пример был выбран, поскольку по мнению авторов он наиболее полно иллюстрирует особенности описываемого подхода.

В целом, любой подход для увеличения отказоустойчивости и повышения надёжности программных систем не всегда может гарантировать корректность возвращаемых результатов, однако на практике существуют допустимые вероятности отказов, которые не должны быть превышены. Исследования надёжности и вероятности отказа могут помочь в принятии решения о применении наиболее подходящей архитектуры для каждого конкретного случая. $t / (n - 1)$ -вариантное программирование может стать одной из таких альтернатив.

Литература

1. Колина А.М., Тарасова С.Д. Метрики и атрибуты оценки качества программного обеспечения // [сайт конференции] URL: <https://fortus-science.ru/index.php/rgu1/article/view/154> (дата обращения 30.06.2022).
2. Оценка аппаратурной и временной избыточности при использовании аддитивного вектора ошибок для коррекции пакетных ошибок в цифровых системах передачи

данных/ А.А. Павлов и др. //Радиотехника. 2021. Т. 85. №. 7. С. 140-150.

3. Кульба В.В., Сомов С.К., Шелков А.Б. Анализ влияния использования информационной избыточности на показатели надёжности распределённых информационных систем //Надёжность. 2022. Т. 22. №. 1. С. 4-12.

4. Наумов А.А., Айдинян А.Р. Надёжность программного обеспечения и методы ее повышения //Инженерный вестник Дона. 2018. № 2 (49). С. 98.

5. Подвальный С.Л., Леденева Т.М. Многоальтернативность как основа обеспечения интеллектуальности систем управления //Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 11. С. 17-23.

6. Грузенкин Д.В., Новиков О.С., Суханова А.В. Мультиверсионное ПО и блоки восстановления – два способа защиты от ошибок //Новая наука: От идеи к результату. 2016. № 11-2. С. 72-75.

7. Kovalev I.V. System of Multi-Version Development of Spacecrafts Control Software. Berlin: Pro Universitate Verlag Sinzheim, 2001. 80 p.

8. Avizienis A., Chen L. On the implementation of N-version programming for software fault-tolerance during program execution // Proc. of the IEEE COMPSAC'77. Chicago, USA, 1977. P. 149–155.

9. Грузенкин Д.В., Шаварин Д.О. Метод блоков восстановления для повышения надёжности программного обеспечения: сравнение с мультиверсионным программированием // Современные инновации, системы и технологии. 2022. №3. С. 0127–0138.

10. Xu J. The $t(n-1)$ -diagnosability and its applications to fault tolerance // [1991] Digest of Papers. Fault-Tolerant Computing: The Twenty-First International Symposium. IEEE, 1991. p. 496-503.

11. Xu J., Randell B. Software fault tolerance: $t(n-1)$ -variant programming //IEEE Transactions on Reliability. 1997. Vol. 46. № 1. p. 60-68.

12. Сарамуд М.В. Модельно-алгоритмическое обеспечение анализа отказоустойчивости программных комплексов встраиваемых систем управления реального времени: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. Сиб. гос. ун-т науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2018. 203 с.

13. Gruzhenkin D.V. N-VersionExperimentDataGenerator: The program generates experiment data simulating N-version module execution. Also it runs vote algorithms. 2022. 26 September. URL: <https://github.com/dvgruzhenkin/N-VersionExperimentDataGenerator>.

Поступила 12.10.2022; принята к публикации 15.12.2022

Информация об авторах

Грузенкин Денис Владимирович – старший преподаватель кафедры информатики, Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета (660074, РФ, г. Красноярск, ул. Киренского, 26), e-mail: guzhenkin.denis@good-look.su, тел. +7(923)287-91-25, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6954-8870>.

Едреев Владимир Владимирович – студент 3 курса кафедры интеллектуальных систем управления, Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета (660074, РФ, г. Красноярск, ул. Киренского, 26), e-mail: vv_edreev@mail.ru.

Пантелеев Данил Александрович – студент 3 курса кафедры интеллектуальных систем управления, Институт космических и информационных технологий Сибирского федерального университета (660074, РФ, г. Красноярск, ул. Киренского, 26), e-mail: panteleev03@mail.ru.

t / (n – 1)-VARIANT PROGRAMMING

D.V. Gruzenkin, V.V. Edreev, D.A. Panteleev

Siberian Federal University, *Institute of Space and Information Technology, Krasnoyarsk, Russia*

Abstract: there are such kinds of industry and human activity where software reliability is critically important for some control system correct functioning. To improve software reliability, there are many approaches, including those based on software redundancy. For example, recovery blocks and N-version programming are the most popular among them. However, there are also alternative approaches that are much less sanctified in the literature, for example, $t/(n-1)$ -variant programming. Although the description of this approach is presented very sparsely in publications, it is used in scientific papers and dissertations to compare its effectiveness with the effectiveness of N-version programming voting algorithms. This paper provides a general description and additional explanations for the $t/(n-1)$ approach, and also reveals the points missed in the original articles. In addition, based on this approach, we compiled an algorithm that was not actually described in the original articles, and the principles of its operation were analyzed using a model example. The algorithm presented in the article allows solving not only specific tasks, but can also be applied to a whole tasks class. The article describes an experiment in which the efficiency of an algorithm based on $t/(n-1)$ -variant programming is compared with N-version programming voting algorithms and the recovery blocks approach. The results of the experiment are also presented

Key words: $t/(n-1)$, software reliability, software redundancy, N-version programming, recovery blocks

References

1. Kolina A.M., Tarasova S. D. “Metrics and attributes of quality assessment of software”, *Innovations in Science, Education and Business*, available at: <https://fortus-science.ru/index.php/rgul/article/view/154> (date of access 06.30.2022).
2. Pavlov A.A. et al. “Estimation of hardware and time redundancy when using an additive error vector to correct burst errors in digital data transmission systems”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2021, vol. 85, no. 7, pp. 140-150.
3. Kulba V.V., Somov S.K., Shelkov A.B. “Analysing the effect of information redundancy on the dependability indicators of distributed information systems”, *Reliability (Nadezhnost’)*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 4-12.
4. Naumov A.A., Aydynyan A.R. “Software reliability and methods for improving it”, *Engineering Bulletin of the Don (Inzhenernyy vestnik Dona)*, 2018, no. 2(49), pp. 98.
5. Podvalnyy S.L., Ledeneva T.M. “Multi-alternativeness as a basis for ensuring the intelligence of control systems”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 11, pp. 17-23.
6. Gruzenkin D.V., Novikov O.S., Sukhanova A. V. “N-version software and recovery blocks – two ways to protect against errors”, *New Science: From Idea to Result (Novaya nauka: Ot idei k rezul'tatu)*, 2016, no. 11-2, pp. 72-75.
7. Kovalev I.V. “System of multi-version development of spacecrafts control software”, Berlin: Pro Universitate Verlag Sinsheim, 2001, 80 p.
8. Avizienis A., Chen L. “On the implementation of N-version programming for software fault-tolerance during program execution”, *Proc. of the IEEE COMPSAC’77*, Chicago, USA, 1977, pp. 149–155.
9. Gruzenkin D.V., Shavarin D.O. “Recovery blocks method to improve software reliability: comparison with N-version programming”, *Modern Innovations, Systems and Technologies (Sovremennye innovatsii, sistemy i tekhnologii)*, 2022, no. 3, pp. 0127–0138.
10. Xu J. “The $t(n-1)$ -diagnosability and its applications to fault tolerance”, *Digest of Papers. Fault-Tolerant Computing: The Twenty-First International Symposium – IEEE*, 1991, pp. 496-503.
11. Xu J., Randell B. “Software fault tolerance: $t/(n-1)$ -variant programming”, *IEEE Transactions on Reliability*, 1997, vol. 46, no. 1, pp. 60-68.
12. Saramud M.V. “Model-algorithmic support for the analysis of fault tolerance of software complexes of embedded real-time control systems: dissertation” (“Model’no-algoritmicheskoye obespechenie analiza otkazoustoychivosti programmnykh kompleksov vstraivaemykh sistem upravleniya real'nogo vremeni”), Cand. of Tech.I Sci. diss., 05.13.01, M.F. Reshetnev Sib. State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, 2018, 203 p.
13. Gruzenkin D.V. “N-VersionExperimentDataGenerator: The program generates experiment data simulating N-version module execution. Also it runs vote algorithms”, 2022, 26 September, available at: <https://github.com/dvgruzenkin/N-VersionExperimentDataGenerator>.

Submitted 12.10.2022; revised 15.12.2022

Information about the authors

Denis V. Gruzenkin, Assistant Professor, Institute of Space and Information Technology of Siberian Federal University (26 Kirenskogo St., Krasnoyarsk 660074, Russia), e-mail: gruzenkin.denis@good-look.su, tel.: +7(923)287-91-25, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6954-8870>.

Vladimir V. Edreev, student, Institute of Space and Information Technology of Siberian Federal University (26 Kirenskogo St., Krasnoyarsk 660074, Russia), e-mail: vv_edreev@mail.ru.

Danil A. Panteleev, student, Institute of Space and Information Technology of Siberian Federal University (26 Kirenskogo St., Krasnoyarsk 660074, Russia), e-mail: panteleev03@mail.ru.

УПРАВЛЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫМ КОНТЕНТОМ В СОСТАВЕ ЦИФРОВЫХ МАКЕТОВ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ

А.Н. Юров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены методики по размещению инженерной информации (линейных размеров, технических условий и т.д.) в составе импортируемой сборочной единицы средствами геометрического ядра Open CASCADE. Разработка связана с исследованием экспортных форматов и получением из них состава структуры цифровых моделей деталей в сборочных единицах, внесением технических условий и построением линейных размеров в макете изделия. В проектировании программного обеспечения используются технологии, обеспечивающие работу с обменными форматами данных, решения, позволяющие получить геометрию модели и техническую информацию из файлов. Для обоснования создания программного компонента приводится структурное описание проектного модуля при внесении инженерных данных в состав цифрового макета изделия, представлен процесс по загрузке сборочной единицы, который должен сопровождаться не только извлечением геометрии каждой модели детали сборки, но и получением имен для всех единиц, входящих в состав сборочного узла. Для извлечения перечня наименований деталей сборочной единицы подготовлено алгоритмическое решение. Кроме того, предложен алгоритм установки линейных размеров, где позиционирование каждого из них определяется контрольными точками и плоскостью, в которой будет размещён размер. Разработка подготовлена для использования в операционной системе Linux Manjaro на базе 64-х разрядной архитектуры

Ключевые слова: экспортные форматы данных, инженерные данные, цифровые макеты изделий, геометрическое ядро Open CASCADE, операционные системы с открытым исходным кодом

Введение

Визуализация и представление цифровых макетов изделий является важной составляющей любого процесса проектирования в машиностроении, а также на всех производственных этапах работы с цифровой моделью в рамках жизненного цикла. Все работы, связанные с проектированием изделий, производятся в автоматизированных системах, в которых можно реализовать требуемые задачи производства [7,8].

Следует отметить, что полное представление 3D объекта проектирования [5,6,9-11] с размерами и технической информацией к изготовлению изделий машиностроения позволяет однозначно оценить весь масштаб работ, который необходим в процессе производства.

Под инженерным контентом подразумевается некоторый состав данных с текстовой информацией и графическими обозначениями, который используется для описания изделия непосредственно в составе документа. Такой набор информации обеспечивает указание баз, задание размеров, допусков, посадок и шероховатостей, а также

внесение текстовых записей, согласно требованиям к изготовлению на производстве, в модели деталей и сборок. Информация ассоциативно привязывается к геометрии и вносится непосредственно в 3-х мерную модель с возможностью построения 3D сечений и разрезов. При этом обеспечивается взаимосвязь данных в 2D чертежах и автоматическое распознавание значений допусков и шероховатостей при подключении модулей, связанных с обработкой и изготовлением изделий (например, САМ проектных решениях).

Требования для разработки

Проектирование программного решения, в котором обеспечивается работа с инженерными данными в составе сборочной модели изделия, требует решения следующих задач:

- необходима визуализация всех элементов сборочной модели, топологическая геометрия каждого из которых должна быть извлечена из экспортного формата данных;
- требуется получение полного списка всех компонентов, входящих в сборочную единицу;

- обязательным условием является обеспечение полной ассоциативной связи между отображаемыми компонентами (детальями) сборки и их названиями в составе изделия;

- определение любых контрольных точек на сборке и отображение линейного размера между ними;

- отображение технических условий в составе сборочной единицы.

Согласно перечисленным задачам, которые необходимы в реализации проекта, предлагается следующая схема построения приложения (рис. 1).

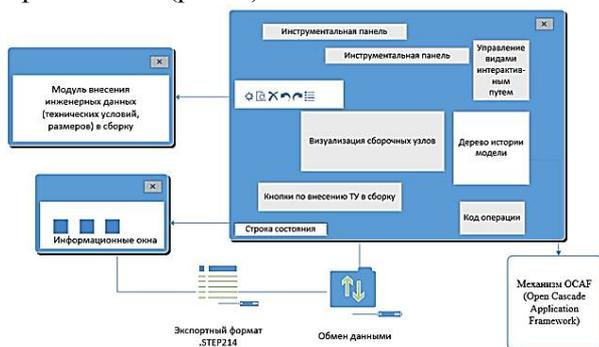


Рис. 1. Прототип проектного решения

Отображение моделей можно выполнить средствами геометрического ядра [1-3], если будет сформирован состав цифрового макета изделия в системе. При этом, если перечень объектов (моделей деталей в составе сборке) отсутствует, то операция по визуализации объектов не выполняется. Перед загрузкой сцена должна быть освобождена от объектов, построенных на предыдущих операциях, а после отображения – объекты должны быть определены в заданном масштабе. Схема алгоритмического решения представлена на рис. 2.

Процесс по загрузке сборочной единицы должен сопровождаться не только извлечением геометрии каждой модели детали сборки, но и получением имени (description) этой детали. Примерный алгоритм для реализации представлен на рис. 3.

Установка линейного размера определяется контрольными точками и плоскостью, в которой будет размещён размер. Плоскость можно создать по трем точкам. Для этих целей можно задействовать любое ребро произвольной детали в пределах сборочной единицы, которая на текущий момент загружена в систему. Для размера требуется определить его атрибуты, после чего

отобразить размер в контексте сборки. Алгоритм для реализации представлен на рис. 4.

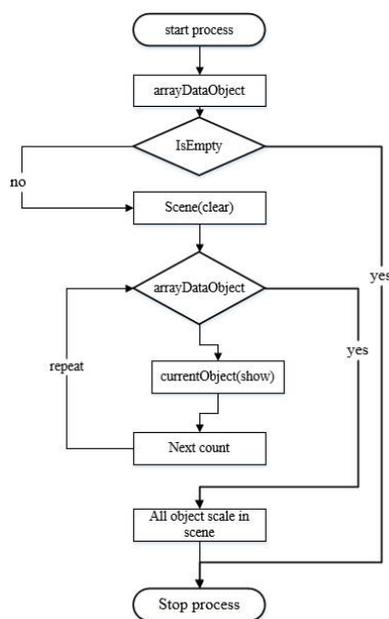


Рис. 2. Алгоритм отображения элементов сборки в проектном решении

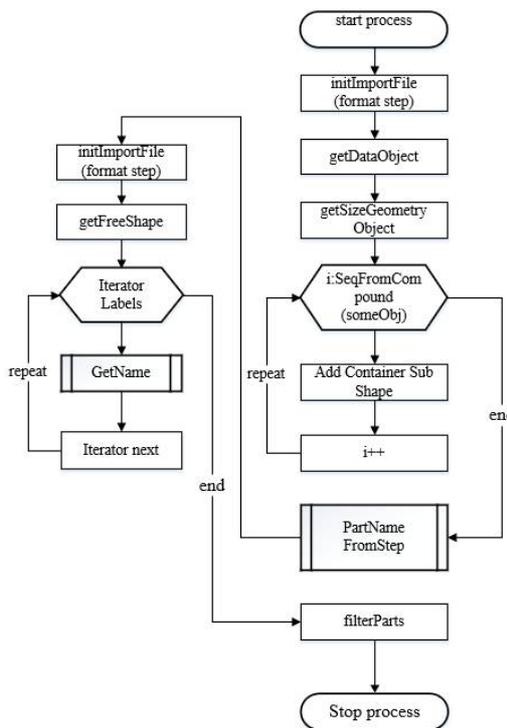


Рис. 3. Алгоритм получения состава сборочной единицы из экспортного формата данных

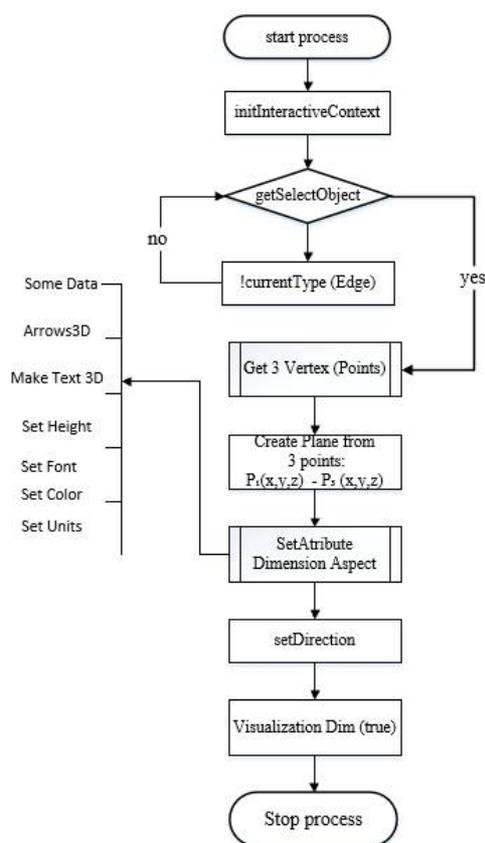


Рис. 4. Алгоритм установки линейных размеров

Реализация проекта

Интерфейс приложения был подготовлен на основе шаблонного класса окна и содержит меню, панели инструментов, набора действий на основе одноименного класса, обработчика клавиш клавиатуры, а также методов, которые обеспечивают загрузку данных, внесение линейных размеров и технических условий. Кроме того, создано описание двух функциональных диалогов по размерам и внесению текста в модель сборочного узла, а также использовалась безопасная ссылка на объект визуализатора и указатель на объекты класса геометрического ядра.

Диалоговое окно, позволяющее передать параметры для создания размеров в сборке, показано на рис. 5. Особенностью разработанного диалогового окна является функционал, позволяющий не перекрывать главное окно приложения и обращаться к модели для указания контрольных точек, участвующих в построении вспомогательных линий линейных размеров.

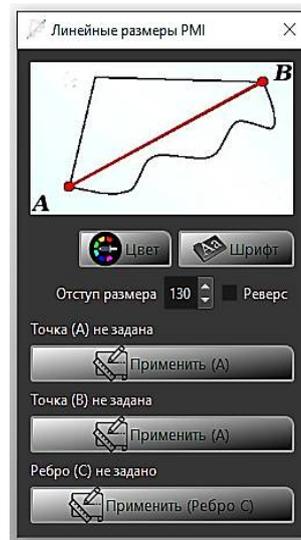


Рис. 5. Диалоговое окно по созданию линейных размеров

На рис. 6 показана реализация диалогового окна по созданию и размещению технических условий в сборочной единице.

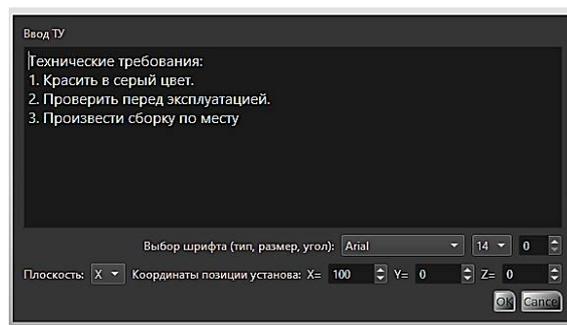


Рис. 6. Диалоговое окно по созданию технических условий в сборке

Для того чтобы показать размер между объектами, необходимо определить факторы задания этого размера, например, используя точку или точку, а также поверхность (ребро), до которого по кратчайшему расстоянию необходимо выполнить размер. Добавление размеров в разработанном приложении в деталях сборочного узла связано с выбором произвольных контрольных точек, которые становятся доступны после вызова немодального диалогового окна пользователем.

После того, как точки выбраны и выполнено условие, связанное с указанием направления создания линейного размера, производится его построение.

Условия для построения размеров могут быть основаны выбором направления нормали поверхности, которой принадлежат контрольные точки, одна из них - некоторая поверхность, параллельно размещенная

относительно размера. В работе размещение размеров выполняется по ребру, в направлении которого строится линейный размер. Высота размера реализуется согласно параметрам, определяемыми пользователем в диапазоне заданных значений. Реализация и построение размеров показаны на рис. 7.

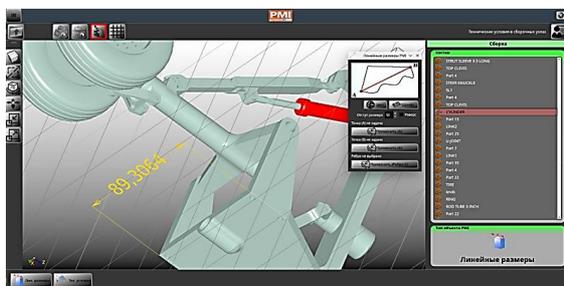


Рис. 7. Построение линейных размеров в сборочном узле

Подготовка технических условий выполнялась аналогичным образом (рис. 8).

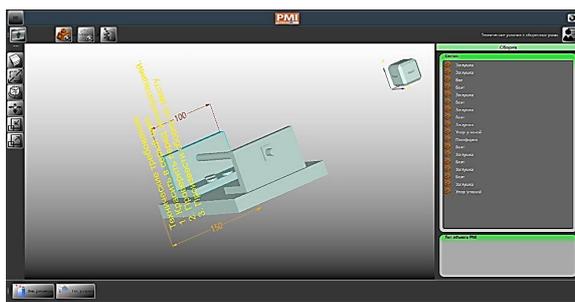


Рис. 8. Подготовка к выводу в контексте отображения сборочного узла технических требований

Заключение

В работе представлены методики по работе с инженерной информацией (линейных размеров, технических условий и т.д.) в составе импортируемой сборочной единицы средствами геометрического ядра Open CASCADE, спроектировано программное решение, в котором реализован механизм размещения технического инженерного контента в составе сборочного узла. Для работы с приложением необходимо подготовить несколько сборок в экспортном формате step. В процессе работы приложение при открытии модели [4] изделия получит информацию о геометрических объектах, входящих в состав сборочного узла, а также весь набор строковых записей, которые соответствуют моделям деталей сборки.

Получение строковых записей из обменного формата было реализовано на

основе разработанного рекурсивного алгоритма.

Выполнена комплексная работа по выявлению необходимых функциональных возможностей по использованию классов геометрического ядра Open CASCADE, на основе которых подготовлено программное обеспечение.

Кроме того, созданы интерфейсные элементы системы, обеспечивающие интерактивный процесс по внесению инженерного контента в цифровую модель сборочного узла.

Подготовлены методы и классы, обеспечивающие установку линейных размеров в пределах любой импортированной в программный продукт сборочной единицы.

Литература

1. Еремин И.А., Рыжков В.А., Килина А.А. Open CASCADE - инструмент для разработки системы автоматизированного проектирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 12.2. С. 82-85.
2. Юров А.Н. Организация и работа с данными PMI в моделях средствами геометрического ядра Open CASCADE // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной памяти д.т.н., профессора Зайцева Александра Ивановича. Воронеж: ООО "НАУЧНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ГУСЕВЫХ", 2019. С. 51-53.
3. Похилько А.Ф., Цыганков Д.Э. Формализация процесса построения 3D-модели изделия на основе библиотек Open CASCADE // Системный анализ в проектировании и управлении: сб. науч. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: ФГАОУВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2015. С. 29-31.
4. Об информационном обмене между CAD-системами / Л.И. Райкин, И.Н. Мерзляков, А.Д. Филинских, А.А. Бойтяков // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 3 (159). С. 65-72.
5. Лячек Ю.Т., Алькади Лайс Д.Г. Методы создания параметрических моделей геометрических объектов в современных САПР // Кибернетика и программирование. 2016. № 2. С. 42-51.
6. Лячек Ю.Т. Геометрическое моделирование. Параметризация и модификация 3D-моделей и чертежей в САПР. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
7. Лезин И.А., Маркелов Д.Е. Автоматизированная система классификации конструкторско-технологических элементов деталей с использованием баз знаний // Главный механик. 2014. № 5. С. 38-41.
8. Кондратьев С.Е., Кожевников Н.О., Ульянов О.В. Автоматизация процессов управления конструктивной электронной структурой изделия // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 3. С. 143-146.
9. Кондаков А.И., Зайцев А.В. Параметризация процессов изготовления деталей машин // Главный механик. 2015. № 5-6. С. 31-35.

10. Козырев Д.Б., Абакумов Е.М. Типизация 3D-моделей деталей в соответствии с целями использования моделей // Информационные технологии и системы: тр. IV Междунар. науч. конф. Челябинск: ЧелГУ, 2015. С. 155-157

11. Горбачев И.В., Похилько А.Ф. Технология представления модели в функционально адаптированной САПР // Автоматизация процессов управления. 2008. № 3. С. 39-42.

Поступила 16.09.2022; принята к публикации 13.12.2022

ENGINEERING CONTENT MANAGEMENT AS PART OF DIGITAL ASSEMBLY LAYOUTS

A.N. Yurov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the work considers methods for placing engineering information (linear dimensions, specifications, etc.) as part of the imported assembly unit by means of the Open CASCADE geometric core. The development is connected with the research of export formats and obtaining from them the structure of digital models of parts in the assemblies, entering technical specifications and building linear dimensions in the product layout. The software design uses technology to work with CAD data exchange formats, solutions that allow you to obtain model geometry and technical information from the files.

To justify the creation of the software component, a structural description of the design module is given when engineering data is introduced into a digital product layout, a process for loading an assembly unit is presented, which should be accompanied not only by extracting the geometry of each part model of the assembly, but also by obtaining names for all the units that are part of the assembly unit. An algorithmic solution has been prepared to extract the list of assembly part names. In addition, an algorithm for setting linear dimensions, where the positioning of each dimension is determined by the control points and the plane in which the dimension will be placed is proposed.

The development is prepared for use in the Linux Manjaro operating system based on 64-bit architecture.

Key words: CAD export data formats, engineering data, digital product layouts, Open CASCADE geometric core, open source operating systems.

References

1. Eremin I.A., Ryzhkov V.A., Kilina A.A. "Open CASCADE - a tool for developing a computer-aided design system", I.A. Eremin, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 12-2, pp. 82-85.
2. Yurov A.N. "Organization and work with PMI data in models by means of geometric kernel Open CASCADE", *Proc. of the Int. sci. and tech. conf. dedicated to the memory of Doctor of Science, Professor Alexander Ivanovich Zaitsev: New Technologies in Scientific Research, Design, Management, Production (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovani, upravlenii, proizvodstve)*, 2019, pp. 51-53.
3. Pokhil'ko A.F., Tsygankov D.E. "Formalization of the process of constructing a 3D model of the product on the basis of Open CASCADE libraries", *Collection of sci. papers of the XIX Int. sci.-pract. conf.: System Analysis in Design and Management (Sistemnyy analiz v proektirovani i upravlenii)*, 2015, pp. 29-31.
4. Raykin L.I., Merzlyakov I.N., Filinskikh A.D., Boytyakov A.A. "On information exchange between CAD-systems", *Information Technologies in Design and Production (Informatsionnye tekhnologii v proektirovani i proizvodstve)*, 2015, no. 3 (159), pp. 65-72.
5. Lyachek Yu.T., Alkadi Lais D.G. "Methods of creating parametric models of geometric objects in modern CAD", *Cybernetics and Programming (Kibernetika i programmirovaniye)*, 2016, no. 2, pp. 42-51.
6. Lyachek Yu.T. "Geometric modeling. Parameterization and modification of 3D-models and drawings in CAD" ("Geometricheskoe modelirovaniye. Parametrizatsiya i modifikatsiya 3D-modeley i chertezhey v SAPR"), St. Petersburg: SPbGETU "LETI", 2015, 160 p.
7. Lezin I.A., Markelov D.E. "Automated system of classification of design and technological elements of parts using knowledge bases", *Chief Mechanic (Glavnyy mekhanik)*, 2014, no. 5, pp. 38-41.
8. Kondrat'ev S.E., Kozhevnikov N.O., Ul'yanin O.V. "Automation of control processes of constructive electronic product structure", *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, no. 3, pp. 143-146.
9. Kondakov A.I., Zaytsev A.V. "Parameterization of the processes of manufacturing machine parts", *Chief Mechanic (Glavnyy mekhanik)*, 2015, no. 5-6, pp. 31-35.
10. Kozlyrev D.B., Abakumov E.M. "Typification of 3D-models of parts in accordance with the purpose of using models", *Proc. of the Fourth Int. Sci. Conf.: Information Technology and Systems (Informatsionnye tekhnologii i sistemy)*, Chelyabinsk State University, 2015, pp. 155-157
11. Gorbachev I.V., Pokhil'ko A.F. "Technology of model representation in functionally adapted CAD", *Automation of Control Processes (Avtomatizatsiya protsessov upravleniya)*, 2008, no. 3, pp. 39-42.

Submitted 16.09.2022; revised 13.12.2022

Information about the authors

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

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ СЕТЕВЫХ СТАНДАРТОВ

К.И. Никишин

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

Аннотация: на сегодняшний день часто используются распределенные сети. К распределенным сетям относятся и беспроводные сети. Для управления автономными объектами как раз используются беспроводные сети. Рассматриваются сетевые стандарты беспроводной связи, в том числе и для работы в беспилотных летательных аппаратах, такие как стандарты IEEE 802.11 и MAVlink, поскольку беспроводные технологии для передачи информации более широко распространены и используются в разных сферах (телекоммуникации, «умный дом», технический мониторинг, «Интернет вещей», беспилотные технологии). Подробно рассматриваются особенности и формат передачи сообщений согласно сетевым стандартам IEEE 802.11 и MAVlink. Для исследования стандартов IEEE 802.11 и MAVlink было разработано специализированное программное обеспечение для валидации данных стандартов, которое обеспечивает посылку сообщений и расшифровывает их отдельно по полям. Проводятся валидация корректности всех блоков передаваемого сообщения и вывод об ошибке пользователю в случае несоответствия стандартам. Рассматриваются методика испытания и тестирование программного обеспечения в случае передачи различных форматов сообщений. При работе программы с тестовыми данными получены подтверждающие результаты работы программы, и все результаты совпали с результатами ручной проверки

Ключевые слова: распределенные сети, Ethernet, беспроводные сети, сетевые стандарты, IEEE 802.11, MAVlink, передача сообщений

Введение

Компьютерные сети играют важную роль в современном мире для передачи данных в самых разных сферах жизнедеятельности (автоматизированные системы, промышленность, авиация, автомобили). Основным способом передачи данных была сеть Ethernet [1-2]. Дальнейшее развитие сети привело к введению «качества обслуживания» (Quality of Service QoS) и стандарту IEEE 802.1 [3-4].

На сегодняшний день часто используются распределенные сети [5]. Данные сети упрощают архитектуру сети, уменьшается количество сетевого оборудования, предусматривается защита от ошибок и отказов в системе. Кроме этого значительно упрощается администрирование сетей на прикладном пользовательском уровне [6-7].

К распределенным сетям относятся программно-конфигурируемые сети (ПКС) [8-11], облачные сети, Time-Triggered Ethernet [12], беспроводные сети. В частности, достоинство ПКС сетей - удобный программный прикладной интерфейс API для регулирования маршрутов потоков в сети, контроль передачи над пакетами и потоками управляется контроллером

(может быть несколько) с помощью протокола OpenFlow [13-15].

Для управления автономными объектами и сетевыми архитектурами часто используются беспроводные или сенсорные сети [16]. Сенсорные сети больше подходят для «Интернета вещей» IoT, «умный дом», когда необходимо считать с датчиков информации и управлять этой информацией, настройками по сети.

Беспроводные технологии для передачи информации более широко распространены (стандарт IEEE 802.11) и используются в разных сферах (телекоммуникации, «умный дом», технический мониторинг, «Интернет вещей», беспилотные технологии и т.д.). Все эти технологии невозможно заменить в системах управления движущимися объектами на воздушном, автомобильном и железнодорожном транспорте.

Поэтому в статье рассматриваются сетевые стандарты беспроводной связи, в том числе и для работы в беспилотных летательных аппаратах, такие как стандарты IEEE 802.11 и MAVlink.

Особенности сетевых стандартов IEEE 802.11 и MAVlink

Стандарт IEEE 802.11 реализуется на двух уровнях семиуровневой модели OSI: на физи-

ческом и канальном уровнях [17]. Передача осуществляется по Wi-Fi и фактически мало отличается от классической передачи по Ethernet [18].

MAVlink (Micro Air Vehicle Link) – протокол обмена данными между наземной станцией и малыми беспилотными летательными аппаратами [19]. Он определяет формат структуры сообщения и процесс сериализации данных (перевод структуры данных в последовательность байтов) на основе приложения. Его можно использовать для передачи местоположения транспортного средства по GPS и скорости его передвижения.

MAVlink имеет простую структуру, которая позволяет поддерживать различные типы устройств и способы передачи информации (Wi-Fi, Ethernet, IP Network).

Протокол MAVLink можно использовать поверх некоторых каналов связи:

- последовательное соединение (UART, USB и др.);
- UDP (Wi-Fi, Ethernet, 3G, LTE);
- TCP (Wi-Fi, Ethernet, 3G, LTE).

Система связывается со станцией посредством обмена MAVlink - сообщениями, которые являются бинарно-сериализованными сообщениями. Термин бинарно-сериализованные означает, что сообщения представляются в виде последовательности байтов, которые передаются через сеть. Получатель сериализованного сообщения производит десериализацию в обратном порядке, чтобы заново воссоздать оригинальное сообщение, которое было отправлено. Одним из свойств бинарной сериализации является значительное уменьшение размера сообщения.

Каждое MAVlink - сообщение содержит заголовок, добавляющийся к полезной нагрузке сообщения. Первым полем является STX, который обозначает начало MAVlink – кадра. В MAVlink 1.0 STX равен специальному символу 0xFE. Второй байт LEN представляет длину сообщения в байтах и закодирован в один байт.

Третий байт SEQ означает последовательность цифр в сообщении. Он закодирован в 1 байт и может принимать значения от 0 до 255. Когда он достигает значения 255, последовательность цифр обнуляется и затем увеличивается с каждым сгенерированным сообщением. Последовательность номеров сообщения позволяет определить потерянные данные.

Четвертый байт SYSID показывает ID системы. У каждой системы должен быть свой системный ID, если они управляются одной станцией. Системный ID, равный 255, обычно дается станциям. Одно из ограничений MAVLink 1.0 связано с лимитом количества дронов, управляемых одной станцией, до 254 из-за того, что ID системы закодирован в один байт.

Пятый байт - это ID компонента (COMPID), и он определяет компонент системы, который отправляет сообщение. В MAVLink 1.0 есть 27 типов оборудования (т.е. компонентов). Если отсутствует подсистема или компонент, то этот байт не используется. Шестой байт показывает ID сообщения (MSGID), который указывает тип сообщения.

Например, сообщения с ID, равным 0, обозначают сообщения типа HEARTBEAT, которые показывают, что система работает, и отправка сообщения происходит каждую секунду. Еще один пример с MSGID, равным 0, который содержит GPS координаты системы.

ID сообщения - это важная информация, которая позволяет разобрать точную информацию, какие данные будут находиться в полезной нагрузке. Каждое сообщение содержит определенное количество полей и сериализуется в двоичном формате в определенном порядке в зависимости от стандартов спецификации. За ID сообщения следует само сообщение (PAYLOAD), которое может занимать от 0 до 255 байт.

Последние два байта используются для контрольной суммы CHECKSUM. СКА и СКВ, нижний и верхний байт, соответственно, содержат контрольную сумму пакета. Они необходимы для того, чтобы отправленное сообщение не изменилось во время передачи и отправитель и получатель имели одно и то же сообщение. На рис. 1 представлен формат пакета MAVLink [20].

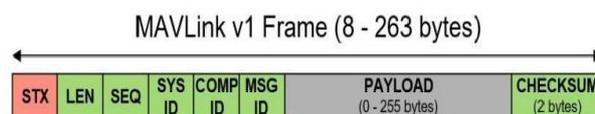


Рис. 1. Формат сообщения протокола MAVLink

Разработка программного обеспечения на основе сетевых стандартов IEEE 802.11 и MAVLink

Для исследования стандартов IEEE 802.11 и MAVLink было разработано программное обеспечение для валидации данных стандартов, обеспечивающее посылку и расшифровывающее её отдельно по полям. Выполняются валидация корректности всех блоков передаваемого сообщения и вывод об ошибке пользователю в случае несоответствия стандартам. Вывод данных в поля производится согласно стандарту IEEE 802.11.

В программе используется функция `System::Boolean CheckFile(cli::array<System::Byte>^ file_data)`, которая проверяет соответствие загружаемого файла стандарту IEEE 802.11. В теле функции происходит проверка длины пакета (согласно стандарту, длина пакета равна от 34 до 2346 байт). Далее происходит подсчет контрольной суммы.

Функция `System::Boolean CheckMAVLink(cli::array<System::Byte>^ file_data)` проверяет соответствие загружаемого файла стандарту MAVLink. В теле функции происходит проверка длины пакета (согласно стандарту MAVLink, длина пакета равна от 8 до 263 байт). Далее происходит проверка стартового байта посылки (стартовый байт должен быть равен 0xFE).

После этого происходит проверка поля «Длина» (значение данного поля должно быть равно длине полезной нагрузки пакета). Затем происходит подсчет контрольной суммы.

Функция `System::String^ Convert_Bytes_To_String(cli::array<System::Byte>^ file_data, UInt16 start, UInt16 cnt)` преобразует массив байтов в строку, содержащую шестнадцатеричное значение. Результатом вызова данной функции является строка формата «0xZ», где Z – шестнадцатеричное представление последовательности байтов, являющейся аргументом функции.

Функция `System::String^ Convert_MAC_To_String(cli::array<System::Byte>^ file_data, UInt16 start)` преобразует массив байтов в строку, содержащую MAC-адрес. Результатом выполнения данной функции является строка формата «AA:BB:CC:DD:EE:FF», где AA, BB, CC, DD, EE, FF – шестнадцатеричные представления октетов MAC-адреса.

В случае несоответствия файла стандарту IEEE 802.11 выводится сообщение «Файл не соответствует формату кадра IEEE 802.11». В случае несоответствия файла стандарту MAVLink происходит вывод полей IEEE 802.11 и вывод сообщения «Файл не соответствует формату кадра MAVLink». В случае соответствия файла обоим стандартам производится вывод всех полей посылки.

Методика испытания и результаты тестирования разработанного программного обеспечения

Был создан текстовый файл, который представляет собой сообщение по описанным выше стандартам. Пример сообщения, соответствующий стандартам IEEE 802.11 и MAVLink, приведен на рис. 2.

Address	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f	Dump
00000000	30	30	31	31	41	31	41	32	41	33	42	31	42	32	42	33	0011A1A2A3B1B2B3
00000010	43	31	43	32	43	33	30	30	44	31	44	32	44	33	FE	08	C1C2C300D1D2D3D4
00000020	18	18	4B	05	F3	d5	0c	8a	56	1e	fb	52	ff	ff	f3	6d	xP.yX.NV.nPqaym

Рис. 2. Пример сообщения, соответствующий стандартам IEEE 802.11 и MAVLink

Первые два байта соответствуют полю управления кадром FC стандарта IEEE 802.11. Это стартовое поле длиной в 2 байта, которое содержит контрольную информацию о кадре. Оно состоит из 11 подполей, которые хранят информацию о версии протокола, типе кадра, подтипе кадра, прошел он через точку доступа или нет, повторно отправлен этот кадр или нет, является ли кадр зашифрованным, будут ли после этого отправлены пакеты, порядок сегментов пакета.

Разработанное приложение не включает разбиение полей на подполя, а предназначено для валидации соответствия сообщения стандартам. Следующие два байта представляют собой идентификатор длительности/соединения D/I стандарта IEEE 802.11. Это двухбайтовое поле, которое указывает временной период, который кадр будет занимать канал.

Следующие 3 поля являются адресными полями. Каждый из них занимает 6 байт. Они включают адрес источника DA, следующую точку назначения SA и конец назначения RA.

Следующее поле занимает 2 байта и служит для управления очередностью SC. Оно

находит повторяющиеся кадры и определяет порядок кадров для высшего уровня. Из 16 битов первые 4 предоставляют идентификатор фрагмента, а остальные 12 содержат порядковый номер, который увеличивается с каждой передачей.

Затем следует четвертое адресное поле ТА, которое также занимает 6 байт. Оно является дополнительным адресом, который используется в режиме беспроводной распределенной системы.

Затем следует поле даты, внутри которого происходит проверка на соответствие стандарту MAVLink. Поля кадра протокола MAVLink были описаны ранее. Последние 4 байта содержат информацию для обнаружения ошибок CRC.

Для проверки правильности работы программы были подготовлены текстовые файлы, содержащие сообщения. Содержимое файлов приведено на рис. 3-4. Файл, представленный на рис. 3, содержит сообщение, соответствующее стандартам IEEE 802.11 и MAVLink.

```
Address 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 a b c d e f Dump
00000000 30 30 31 31 41 31 41 32 41 33 42 31 42 32 42 33 0011A1A2A3B1B2B3
00000010 43 31 43 32 43 33 30 44 31 44 32 44 33 fe 06 C1C2C300D1D2D3D4
00000020 15 78 46 05 f3 d5 0c 8a 56 1e fb 52 ff ff f3 6d .xE.yX.WV.ыЯяуш
```

Рис. 3. Сообщение, соответствующее стандартам IEEE 802.11 и MAVLink

Файл, представленный на рис. 4, содержит сообщение, не соответствующее стандартам IEEE 802.11 и MAVLink.

```
Address 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 a b c d e f Dump
00000000 35 34 33 33 35 47 4a 53 26 48 53 4b 4c 5e 5e 38 54335GJS6HSKL**@
00000010 30 4e 4d 47 4b 4c 4d 53 33 32 37 38 30 4e 4a 41 0NMGKLM32780NJA
00000020 4c 4e 4c 5e 38 39 24 5e 2a 4e 48 50 3a 3a 29 29 I.NL.*@9$**NHP:;)
00000030 25 2a 24 23 46 47 42 %*#$#PGB
```

Рис. 4. Сообщение, не соответствующее стандартам IEEE 802.11 и MAVLink

При работе программы с тестовыми данными получены результаты, приведенные на рис. 5. Результаты совпадают с результатами ручной проверки. В случае ошибок при разборе сообщений пользователю выводится сообщение о несоответствии форматам.

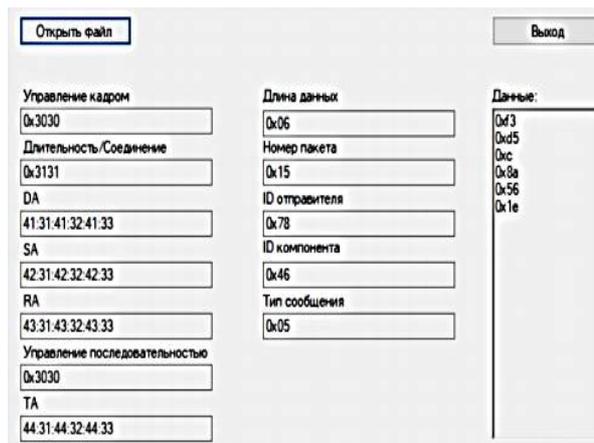


Рис. 5. Результат работы программы в случае передачи сообщения, соответствующего стандартам IEEE 802.11 и MAVLink

Заключение

Рассмотрены сетевые стандарты беспроводной связи, в том числе и для работы в беспилотных летательных аппаратах, такие как стандарты IEEE 802.11 и MAVlink, беспроводные технологии для передачи информации более широко распространены и используются в разных сферах (телекоммуникации, «умный дом», технический мониторинг, «Интернет вещей», беспилотные технологии и т.д.). Подробно описаны особенности и формат передачи сообщений согласно сетевым стандартам IEEE 802.11 и MAVlink.

Для исследования стандартов IEEE 802.11 и MAVLink было разработано программное обеспечение для валидации данных стандартов, обеспечивающее посылку и расшифровывающее её отдельно по полям. Выполняются валидация корректности всех блоков передаваемого сообщения и вывод об ошибке пользователю в случае несоответствия стандартам.

Были проведены методика испытания и тестирование программного обеспечения в случае передачи различных сообщений. При работе программы с тестовыми данными получены подтверждающие результаты работы программы, и все результаты совпадают с результатами ручной проверки.

Литература

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. 943 с.

2. Никишин К.И. Механизм управления трафиком реального времени в коммутаторе Ethernet // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 10. С. 32–37.
3. Описание стандарта IEEE 802.1q [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q.
4. Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames/ E. Kizilov, N. Konnov, K. Nikishin, D. Pashchenko, D. Trokoz // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 44. P. 01011-p.1–01011-p. 5.
5. Программная инфраструктура и визуальная среда распределенной обработки потоков данных в программно-конфигурируемых сетях/ В.П. Корячко, Д.А. Перепелкин, М.А. Иванчикова, В.С. Бышов, И.Ю. Цыганов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 44-54. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-44-54.
6. Перепелкин Д.А., Бышов В.С. Балансировка потоков данных в программно-конфигурируемых сетях с обеспечением качества обслуживания сетевых сервисов // Радиотехника. 2016. № 11. С. 111-119.
7. Леохин Ю.Л., Фатхулин Т.Д. Оценка возможности предоставления гарантированной скорости передачи данных в программно-конфигурируемой оптической сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 71. С. 45-59. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-45-59.
8. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Программно-конфигурируемые сети: учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 288 с.
9. Openflow: enabling innovation in campus networks/ N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan et al.// ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2008. Vol. 38. No. 2. pp. 69-74.
10. Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments/M. Kobayashi, S. Seetharaman, G. Parulkar, G. Appenzeller, J. Little, J. Van Reijendam, N. McKeown// Computer Networks. 2014. Vol. 61. pp. 151-175.
11. Никишин К.И. Моделирование контроллера и верификация процесса передачи данных в программно-конфигурируемых сетях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 75-83.
12. Nikishin K., Konnov N. Schedule Time-Triggered Ethernet // International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.
13. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers/ A. Shalimov et al. // Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia. ACM, 2013.
14. Wael Hosny Fouad Aly. A novel controller placement using Petri-nets for SDNs// Wseas Transactions on Mathematics. 2020. Vol. 19. pp. 598-605.
15. Никишин К.И. Моделирование и верификация топологий программно-конфигурируемых сетей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 67-74.
16. Никишин К.И. Моделирование беспроводной сенсорной сети с использованием OMNET++ // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 78. С. 46-54.
17. Описание стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11.
18. Никишин К.И., Коннов Н.Н. Генератор трафика Ethernet на основе цветных сетей Петри // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 1 (17). С. 299–307.
19. Описание стандарта MAVLink [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/MAVLink>.
20. Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell/ Anis Koubaa, Azza Allouch, Maram Alajlan, Yasir Javed, Abdelfettah Belghith, Mohamed Khalgui// A Survey. 2019. Vol. 7. pp. 87658–87680.

Поступила 15.09.2022; принята к публикации 13.12.2022

Информация об авторах

Никишин Кирилл Игоревич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), тел.: +7 (8412) 66-65-89, e-mail: nkipnz@mail.ru

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR VALIDATION OF NETWORK STANDARDS

K.I. Nikishin

Penza State University, Penza, Russia

Abstract: distributed networks are often used. Distributed networks also include wireless networks. Wireless networks are used to manage autonomous objects. The article discusses wireless communication network standards, including those for work in unmanned aerial vehicles, such as IEEE 802.11 and MAVLink standards, since wireless technologies for transmitting information are more widespread and used in various fields (telecommunications, smart home, technical monitoring, Internet of Things, unmanned technologies). The features and format of message transmission according to IEEE 802.11 and MAVLink network standards are discussed in detail. To research the IEEE 802.11 and MAVLink standards, a specialized software for validating these standards was developed, which ensures the sending of messages and decrypts them separately by fields. Validation of the correctness of all blocks of the transmitted message is carried out and an error message is output to the user in case of non-compliance with the standards. The

article discusses the methodology of testing and testing software in the case of transmission of various message formats. When the program was working with test data, the confirming results of the program were obtained, and all the results coincided with the results of manual verification.

Key words: distributed networks, Ethernet, wireless networks, network standards, IEEE 802.11, MAVLink, message transmission.

References

1. Olifer V.G., Olifer N.A. "Computer networks. Principles, technologies, protocols" ("Komp'yuternye seti. Printsipy, tehnologii, protokoly"), St. Petersburg: Piter, 2010, 943 p.
2. Nikishin K.I. "Real-time traffic control mechanism in an Ethernet switch", *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternyykh i informatsionnykh tehnologiy)*, 2015, no. 10, pp. 32–37.
3. IEEE 802.1q Standart, available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q.
4. Kizilov E., Konnov N., Nikishin K., Pashchenko D., Trokoz D. "Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames", *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 44, pp. 01011-p.1–01011-p. 5.
5. Koryachko V.P., Perepelkin D.A., Ivanchikova M.A., Byshov V.S., Tsyganov I.Yu. "Software infrastructure and visual environment for distributed processing of data streams in software-defined networks", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 65, pp. 44-54. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-44-54.
6. Perepelkin D.A., Byshov V.S. "Balancing data flows in software-defined networks with ensuring the quality of service for network services", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2016, no. 11, pp. 111-119.
7. Leohin Ju.L., Fathulin T.D. "Evaluation of the possibility of providing a guaranteed data transfer rate in a software-defined optical network", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2020, no. 71, pp. 45-59. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-45-59.
8. Koryachko V.P., Perepelkin D.A. "Software-defined networks" ("Programmno-konfiguriruemye seti"), textbook, Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2020, 288 p.
9. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H. et al. "Openflow: enabling innovation in campus networks", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 69-74.
10. Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Reijendam J., McKeown N. "Maturing of OpenFlow and Software-Defined networking through deployments", *Computer Networks*, 2014, vol. 61, pp. 151-175.
11. Nikishin K.I. "Controller modeling and verification of the data transfer process in software-defined networks", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2022, no. 80, pp. 75-83.
12. Nikishin K., Konnov N. "Schedule time-triggered ethernet", *International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020*. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.
13. Shalimov A. et al. "Advanced study of SDN/OpenFlow controllers", *Proc. of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia*. ACM, 2013.
14. Wael Hosny Fouad Aly "A novel controller placement using Petri-nets for SDNs", *Wseas Transactions on Mathematics*, 2020, vol. 19, pp. 598-605.
15. Nikishin K.I. "Modeling and verification of topologies of software-defined networks", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2022, no. 80, pp. 67-74.
16. Nikishin, K.I. "Modeling a wireless sensor network using OMNET++", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2021, no. 78, pp. 46-54.
17. IEEE 802.11 Standart, available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
18. Nikishin K.I, Konnov N.N. "Ethernet traffic generator based on colored Petri nets", *Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society (Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tehnike, prirode i obshchestve)*, 2016, no. 1 (17), pp. 299–307.
19. MAVLink Standard, available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/MAVLink>.
20. Anis Koubaa, Azza Allouch, Maram Alajlan, Yasir Javed, Abdelfettah Belghith, Mohamed Khalgui "Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell", *A Survey*, 2019, vol. 7, pp. 87658 – 87680.

Submitted 15.09.2022; revised 13.12.2022

Information about the authors

Kirill I. Nikishin, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Penza State University (40 Krasnaya str., Penza 440026, Russia), tel.: +7 (8412) 66-65-89, e-mail: nkipnz@mail.ru

АНАЛИЗ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОКРЫТИЯ ТГц СИСТЕМЫ СВЯЗИ С 3D-МАССИВОМ**А.В. Башкиров, И.С. Бобылкин, А.А. Кузёмкин, В.Р. Тимошилова****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассматривается задача оценки положения и ориентации пользователя, оснащенного трехмерной (3D) решеткой, принимающей терагерцовые сигналы дальней зоны по нисходящей линии связи от нескольких базовых станций с известными позициями и ориентациями. Мы выводим границу Крамера–Рао для локализации задачи и определяем покрытие рассматриваемой системы. Сравним распределения нижней границы погрешности традиционной планарной матрицы и конфигураций трехмерной матрицы при различных положениях и ориентациях пользовательского оборудования (UE). Наши численные результаты, полученные для конфигураций массива с равным количеством элементов, показывают очень ограниченный охват конфигурации планарного массива, особенно в диапазоне ориентации UE. И наоборот, конфигурация трехмерного массива предлагает в целом более высокое покрытие с незначительной потерей производительности в определенных положениях и ориентациях UE. В ходе анализа была проведена работа по нахождению границ ошибок положения (РЕВ) и ориентации (ОЕВ), с помощью которых получена количественная оценка покрытия для массивов двухмерной и трехмерной конфигураций. Также проведено моделирование одной базовой станции (BS), в котором сравнивается РЕВ и ОЕВ в различных положениях и ориентациях, в результате чего оценено ТГц покрытие

Ключевые слова: массив, локализация, ТГц связь, покрытия, оценка положения, 3D-решетка

1. Актуальность разработки

С ростом спроса на более высокий трафик данных в беспроводной связи терагерцовый (ТГц) диапазон частот (0,1–10 ТГц) рассматривается как ключевой фактор для будущих систем беспроводной связи шестого поколения (6G) и выше. В дополнение к преимуществам связи, больший размер массива (высокое угловое разрешение) и большая полоса пропускания (высокое разрешение задержки) в высокочастотных системах также обеспечивают высокоточную локализацию, которая широко исследовалась в рамках множественных входов и множественных выходов (ММО) систем связи. Можно предвидеть, что потенциальные приложения с учетом расстояния/угла, такие как виртуальная реальность (VR) / дополненная реальность (AR), безопасность транспортных средств, глобальная навигационная спутниковая система (GNSS) и т. д. будут в дальнейшем использоваться в будущих системах связи.

При локализации на основе геометрии информация о местоположении и ориентации обычно оценивается на основе геометрических измерений, таких как время прибытия (TOA),

разница во времени прибытия (TDOA), угол отклонения (AOD), угол отклонения, прибытия (AOA) и др. Однако методы, основанные на измерениях времени/дальности, такие как TOA и TDOA, требуют жесткой синхронизации. Чтобы избежать этого, применялись методы угловой локализации, которые требуют оснащения приемника/передатчика антенными решетками. За прошедшие годы было предложено множество методов локализации, основанных на одномерных массивах и двумерных однородных массивах. Также были предложены методы локализации с использованием произвольных конфигураций массива. Кроме того, в нескольких работах демонстрируется применение неоднородной конструкции решетки для таких целей, как локализация на ближнем расстоянии, совместная разработка с обнаружением сигнала, снижение стоимости и т. д.

Хотя в этих работах показаны многообещающие результаты локализации и предложены некоторые решения для развертывания мобильных сетей с учетом локализации, проблема покрытия обсуждается редко, что ограничивает доступность предоставления услуг локализации. Для улучшения покрытия и расширения возможностей подключения 3D-массивы могли бы стать одним из перспективных методов.

Несмотря на потенциал 3D-матриц в приложениях локализации, эта концепция еще не получила широкого изучения в области радиолокации из-за непрактичных физических размеров. Однако мы ожидаем, что эта проблема может быть решена в ТГц-диапазоне с гораздо меньшей длиной волны сигнала. Кроме того, существующие работы по локализации 3D-массивов ограничены конкретной конфигурацией массива, ожидается более общая модель для локализации 3D-массива.

Кроме того, поскольку существующие работы по локализации трехмерных массивов ограничены конкретными конфигурациями массивов, такими как V-образные массивы, ожидается более общая модель локализации трехмерных массивов. В этой статье мы рассматриваем сценарий MIMO нисходящей (планарными) структурами. Основные вклады этой статьи заключаются в следующем:

-Мы получаем границу ошибки положения (РЕВ) и границу ошибки ориентации (ОЕВ) для основной задачи локализации в форме ограниченной границы Крамера-Рао (CCRB).

-Мы предоставляем сравнительный анализ производительности 2D- и 3D-массива с использованием распределения РЕВ и ОЕВ для различных положений и ориентаций UE.

-Мы определяем покрытие локализации с помощью кумулятивной функции распределения (CDF) РЕВ и ОЕВ и даем количественную оценку покрытия для конфигураций массивов 2D и 3D.

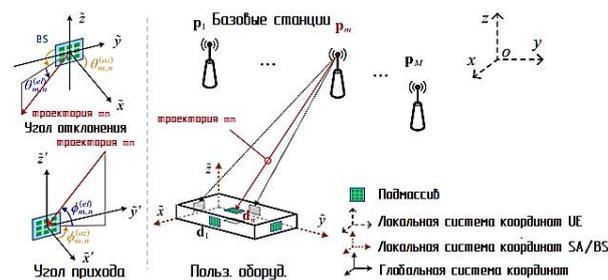


Рис. 1. Иллюстрация сценария локализации в системе связи с несколькими BS и 1 UE с несколькими SA. В левой части показана геометрия азимутальной и вертикальной составляющих измерений AOD и AOA

2. Постановка задачи

Мы рассматриваем сценарий нисходящей линии связи в дальней зоне с M BS и 1 UE, как показано на рис. 1. Позиции и ориентации BS известны в глобальной системе координат. Каждая BS оснащена планарной решеткой для

линии связи в дальней зоне терагерцового диапазона, в котором измерения углов и задержек от нескольких базовых станций (BS) используются для оценки положения и ориентации UE. В терагерцовой связи обычно используемой конфигурацией массива является структура массива подмассивов AoSA, которая может смягчить ограничения высокочастотного оборудования и поддерживать формирование луча низкой сложности. В данной статье мы рассматриваем размещение подмассивов (SA) в трехмерном пространстве с произвольными известными положениями и ориентациями, тогда как каждый SA размещается в двумерном пространстве (т. е. планарном SA). Наше исследование показывает, что развертывание таких конфигураций трехмерных массивов для локализации ТГц может улучшить покрытие по сравнению с обычными двумерными (или измерения AOP. UE состоит из N SA, расположенных в трехмерном пространстве с фиксированными относительными позициями и ориентациями, и каждый SA обеспечивает измерения AOA по отношению к каждой BS, если существует канал прямой видимости (LOS).

Мы используем $\{P_{B,m} \in R^{3 \times 1}\}_{m=1}^M$ для обозначения положения BS в глобальной системе координат, а матрица вращения $\{R_{B,m} \in R^{3 \times 3}\}_{m=1}^M$ для представления ориентации BS. Положение и ориентация UE, которые должны быть оценены, обозначены $P_U \in R^{3 \times 1}$ и $R_U \in R^{3 \times 3}$ соответственно. Более того, мы используем $\{d_n \in R^{3 \times 1}\}_{n=1}^N$ и $\{R_n \in R^{3 \times 3}\}_{n=1}^N$ для обозначения известных относительных положений и ориентаций N SA в локальной системе координат ПО соответственно. Все матрицы вращения лежат в ортогональной группе SO, удовлетворяющей ограничениям (1).

$$\begin{cases} R^T R = I, \\ \det(R) = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Матрица вращения представляет собой отношение вращения между глобальной и локальной системами координат. Например, имея вектор «a» в глобальной системе координат, мы можем получить его координаты в локальной системе координат UE как $\tilde{a} = R_U^T a$. Используя матрицы вращения, мы также можем выразить положение и ориентацию SA в глобальной системе координат. Положение центра n -й SA

определяется выражением $p_n = p_u + R_u d_n$. Для ориентации координаты вектора «а» в локальной системе координат n-го подмассива равны $\tilde{a} = R_n^T R_U^T a$.

В терагерцовом диапазоне пути вне прямой видимости (NLOS) становятся все более редкими и с потерями, поэтому мы рассматриваем только путь LOS. Рассмотрим модель канала OFDM MIMO в дальней зоне, принятый сигнал на k-й поднесущей и g-ю передачу на пути от BS m до SA n в UE.

$$y_{m,n}^g[k] = \sqrt{P} w_U^T H(k, \eta_{m,n}) w_B x^g[k] + w_U^T n^g[k], \quad (2)$$

где P – средняя мощность передачи.

Вектор объединения $w_U \in C^{N_U \times 1}$, $H(k, \eta_{m,n}) \in C^{N_U \times N_B}$ это матрица канала, $w_B \in C^{N_B \times 1}$ – вектор прекодера в BS, $x^g[k] \in C$ – вектор символа сигнала перед прекодером, и $n^g[k] \sim CN(0, \sigma_n^2 I_{N_U})$. Наконец, $\eta_{m,n}$ обозначает параметры канала из BS m в SA n, то есть $\eta_{m,n} = [\theta_{m,n}^{az}, \theta_{m,n}^{el}, \varphi_{m,n}^{az}, \varphi_{m,n}^{el}, \tau_{m,n}]$. Пара АОТ состоит из азимутального угла $\theta_{m,n}^{az}$ и угла места $\theta_{m,n}^{el}$, а пара АОА состоит из азимутального угла $\varphi_{m,n}^{az}$ и угла места $\varphi_{m,n}^{el}$, как показано на рис. 1. Параметры определяются:

$$\theta_{m,n}^{az} = \arctan2(u_2^T R_{B,m}^T (p_U + R_U d_n - p_{B,m}) - p_{B,m}), \quad (3)$$

$$u_1^T R_{B,m}^T (p_U + R_U d_n - p_{B,m}),$$

$$\theta_{m,n}^{el} =$$

$$= \arcsin\left(\frac{u_3^T R_{B,m}^T (p_U + R_U d_n - p_{B,m})}{\|p_U + R_U d_n - p_{B,m}\|_2}\right), \quad (4)$$

$$\varphi_{m,n}^{az} =$$

$$= \arctan2(-u_2^T R_n^T R_U^T (p_U + R_U d_n - p_{B,m}), \quad (5)$$

$$-u_1^T R_n^T R_U^T (p_U + R_U d_n - p_{B,m}))$$

$$\varphi_{m,n}^{el} =$$

$$= \arcsin\left(-\frac{u_3^T R_{B,m}^T (p_U + R_U d_n - p_{B,m})}{\|p_U + R_U d_n - p_{B,m}\|_2}\right), \quad (6)$$

$$\tau_{m,n} = \frac{\|p_U + R_U d_n - p_{B,m}\|_2}{c} + p. \quad (7)$$

В вышеуказанных формулах $u_1 = [1, 0, 0]^T$, $u_2 = [0, 1, 0]^T$, $u_3 = [0, 0, 1]^T$ моделируют общее смещение часов между BS и UE, а c – скорость света. Есть предположение, что все BS синхронизированы друг с другом, а SA UE используют один и тот же тактовый сигнал. Следовательно, ρ фиксировано для всех путей.

В данной работе каждая BS/CA подключена к независимой радиочастотной цепи (РЧЦ) со случайным прекодером/объединителем (фазосдвигатели имеют постоянную амплитуду с фазами, равномерно распределенными от 0 до 2π), принятыми для каждой передачи. Кроме того, ортогональные поднесущие назначаются разным парам BS-SA, чтобы избежать помех между разными каналами. Когда SA в UE получают сигнал, мы сначала оцениваем параметры геометрии канала, такие как АОА, АОД, задержка и комплексное усиление, а затем выполняем локализацию на основе этих оценок.

Рассматривая систему с M BS и 1 UE с N SA, мы имеем не более $M \times N$ путей, каждый со связанными АОД, АОА и задержкой. Однако, в зависимости от положения и ориентации соответствующих BS и SA, некоторые пути могут быть не видны из-за ограниченной диаграммы направленности антенны. Например, если мы предположим, что все антенны имеют полусферическую диаграмму направленности, видимость путей можно смоделировать, определив набор пар индексов как:

$$Q = \{(m, n) | (R_n^T R_U^T (p_{B,m} - p_n), \bar{e}_n > 0, (R_B^T (p_n - p_{B,m}), \bar{e}_{B,m}) > 0)\}. \quad (8)$$

Цель задачи локализации состоит в том, чтобы оценить положение p_U и ориентацию R_U UE из имеющихся: $\theta_{m,n}^{az}, \theta_{m,n}^{el}, \varphi_{m,n}^{az}, \varphi_{m,n}^{el}, \tau_{m,n}$.

Для каждого доступного пути от BS m до SA n UE мы получаем измерения АОД на стороне BS и измерения АОА на стороне UE, а также задержку канала от средства оценки канала. Далее мы складываем все доступные параметры пути как:

$$\eta = [\eta_{(m1,n1)}^T, \dots, \eta_{(mD,nD)}^T]^T \quad (9)$$

Тогда доступный вектор измерения равен $\eta \sim N(\eta, \Sigma)$, где Σ – блочно-диагональная матрица, так как векторы измерений от разных BS независимы. Тогда задача локализации состоит в том, чтобы определить положение p_U и ориентацию R_U на основе η .

3. Ограничение ошибки и показатели производительности

Сначала мы получаем оценку производительности задачи локализации, из которой будут определяться и анализироваться метрики покрытия. Граница Крамера-Рао (CRB) является полезным инструментом, поскольку она дает нижнюю границу среднеквадратичной ошибки (MSE).

Некоторые справочные данные о границе Крамера-Рао.

Рассмотрим задачу оценивания детерминированного неизвестного вектора $x \in R^N$ из наблюдения z с учетом статистической модели $p(z|x)$. Количество информации, которую несет наблюдение о неизвестном, измеряется информационной матрицей Фишера (FIM), которая определяется выражением:

$$I(x) = E_z \{ \nabla_x \log p(z|x) \nabla_x^T \log p(z|x) \}. \quad (10)$$

FIM относится к ковариации ошибки оценки любой несмещенной оценки $\hat{x}(z)$ как:

$$E \{ (x - \hat{x})(x - \hat{x})^T \} \geq I^{-1}(x). \quad (11)$$

Тогда нижняя граница (известная как CRB) оценки MSE определяется выражением:

$$E \{ \|x - \hat{x}\|^2 \} \geq \text{tr}(I^{-1}(x)). \quad (12)$$

Когда неизвестный вектор x должен лежать на многообразии $h(x) = 0$, определяемом избыточными ограничениями $0 \leq K < N$, ковариация ошибок ограничена снизу CCRB как:

$$E \{ (x - \hat{x})(x - \hat{x})^T \} \geq I_{const}^{-1}(x), \quad (13)$$

$$\text{где } I_{const}^{-1}(x) = M(M^T I(x) M)^{-1} M^T. \quad (14)$$

$$\begin{cases} M^T M = I_{N-K}, \\ \frac{\partial h(x)}{\partial x} \cdot M = O_{K \cdot (N-K)}. \end{cases} \quad (15)$$

Путем сбора ортонормированных базисных векторов нуль-пространства матрицы градиентов $\frac{\partial h(x)}{\partial x} \in R^{K \cdot N}$ FIM вектора η можно получить как:

$$I(\eta_{n,m}) = \frac{2}{\sigma^2} \sum_{g=1}^G \sum_{k=1}^K \text{Re} \left\{ \left(\frac{\partial \mu^g[k]}{\partial \eta_{m,n}} \right)^H \left(\frac{\partial \mu^g[k]}{\partial \eta_{m,n}} \right) \right\}. \quad (16)$$

Следовательно, FIM всех параметров канала может быть получен как:

$$I(\eta) = \text{blkdiag} \{ I(\eta_{m1,n1}), \dots, I(\eta_{mD,nD}) \}. \quad (17)$$

В формуле (17) запись «blkdiag» означает формирование блочно-диагональной матрицы. Теперь, учитывая вектор состояния $r = [p_U^T, \rho, \text{vec}(R_U)^T]^T$, мы можем видеть, что η является функцией r . Эти зависимости представлены выражениями (3)-(7). Таким образом, FIM с r в качестве объекта оценивания может быть получена следующая формула (18):

$$I(r) = T^T I(\eta) T, \quad (18)$$

где $T_{i,j} = \frac{\partial \eta_i}{\partial r_j}$.

Учитывая ограничения на R_U в формуле (1) и согласно (14), получаем:

$$I_{const}^{-1}(r) = M(M^T I(r) M)^{-1} M^T. \quad (19)$$

Согласно (15), M может удовлетворять:

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} I_{4 \times 4} & 0_{4 \times 1} & 0_{4 \times 1} & 0_{4 \times 1} \\ 0_{3 \times 4} & -c_3 & 0_{3 \times 1} & c_2 \\ 0_{3 \times 4} & 0_{3 \times 1} & -c_3 & -c_1 \\ 0_{3 \times 4} & c_1 & c_2 & 0_{3 \times 1} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где $[c_1, c_2, c_3] = R_U$. Таким образом, у нас имеется РЕВ и ОЕВ, полученные из:

$$PEB = \sqrt{\text{tr}([I_{const}^{-1}]_{1:3,1:3})}, \quad (21)$$

$$OEB = \sqrt{\text{tr}([I_{const}^{-1}]_{5:13,5:13})}. \quad (22)$$

Покрывтие — это метрика для оценки общей производительности системы

локализации или связи. В этой статье мы определяем охват локализацией как вероятность того, что РЕВ/ОЕВ ниже порога ξ_p/ξ_o , когда UE находится в случайных позициях $p_U \in \Omega_p$ со случайными ориентациями $R_U \in \Omega_R$ (Ω_p/Ω_R — это пространство, в котором UE положение/ориентацию можно выбрать). Более конкретно, покрытие положения $C_p(\xi_p)$ и покрытие ориентации $C_o(\xi_o)$ могут быть определены соответственно (23), (24):

$$C_p(\xi_p) = \frac{\int_{\Omega_p} \int_{\Omega_R} H(\xi_p - PEB(p_U, R_U)) dp_U dR_U}{\int_{\Omega_p} \int_{\Omega_R} dp_U dR_U} \quad (23)$$

$$C_o(\xi_o) = \frac{\int_{\Omega_p} \int_{\Omega_o} H(\xi_p - OEB(p_U, R_U)) dp_U dR_U}{\int_{\Omega_p} \int_{\Omega_o} dp_U dR_U}, \quad (24)$$

где $dp_U = dp_{U_x} dp_{U_y} dp_{U_z}$, $dR_U = d\alpha d\beta d\gamma^2$, ξ_p и ξ_o — заданные пороги охвата положения и охвата ориентации соответственно, а $H(\cdot)$ — ступенчатая функция Хевисайда (т. е. $H(t) = 1$, $t \geq 0$ и ноль в другом месте).

Прежде чем представить результаты нашего моделирования, мы можем получить представление, проанализировав модели. В-первых, из моделей (3)–(7) видно, что ориентация UE связана с АОТ только за счет $R_U d_n$. Опять же, d_n — это положение подмассива n в локальной системе координат UE, масштаб которого имеет тот же порядок величины, что и масштаб размера UE, но намного меньше, чем расстояние между UE и BS. Это означает, что вращение UE (изменение ориентации R_U) не вызывает большой разницы в члене $p_U + R_U d_n - p_{B,m}$ и, следовательно, не вызывает большой разницы в АОД. Таким образом, АОД несут ограниченную информацию об ориентации UE. Напротив, АОА несут большую часть информации о ротации UE. Таким образом, можно сделать вывод, что в случаях с лучшими оценками АОА появится более низкий ОЕВ.

4. Моделирование

Мы рассматриваем BS, который оснащен однородной плоской матрицей 8×8 с интервалом в половину длины волны между элементами. Со стороны UE мы анализируем два различных типа конфигураций массива (2D и 3D). Каждая конфигурация имеет 6 SAs и каждый SA имеет антенные элементы 4×4 с интервалом в половину длины волны. Для 3D-матрицы каждый SA прикреплен в центре поверхности куба размером $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ м³. С другой стороны, в 2D-массиве все SAs расположены в одной плоскости. На рис. 2 показаны два макета массива, в которых куб разложен в плоскость. Другие параметры задаются следующим образом: средняя мощность передачи $P = 0$ дБм, несущая частота $f_c = 140$ ГГц, полоса пропускания $W = 1000$ МГц, коэффициент передачи $G = 50$, количество несущих $K = 10$, коэффициент шума $N_0 = -173,855$ дБм/Гц и показатель шума $N_f = 10$ дБм.

Чтобы дать наглядную характеристику ориентации, мы используем углы Эйлера $[\alpha, \beta, \gamma]^T$ для представления матрицы вращения R . Порядок поворота важен при сопоставлении между углами Эйлера и матрицей поворота. В этой статье мы используем следующую последовательность вращения:

$$R = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha), \quad (25)$$

где $R_x(\alpha)$ обозначает поворот на α градус вокруг оси X, и аналогично для $R_y(\beta)$ и $R_z(\gamma)$.

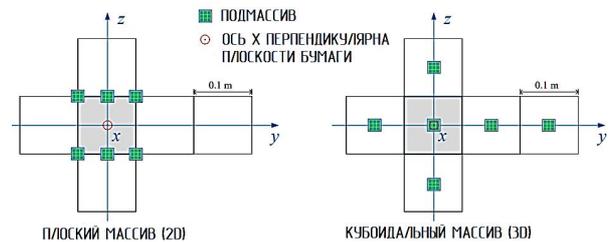


Рис. 2. Иллюстрация плоского (2D) и кубоидального (3D) расположения массивов путем разложения куба в плоскость

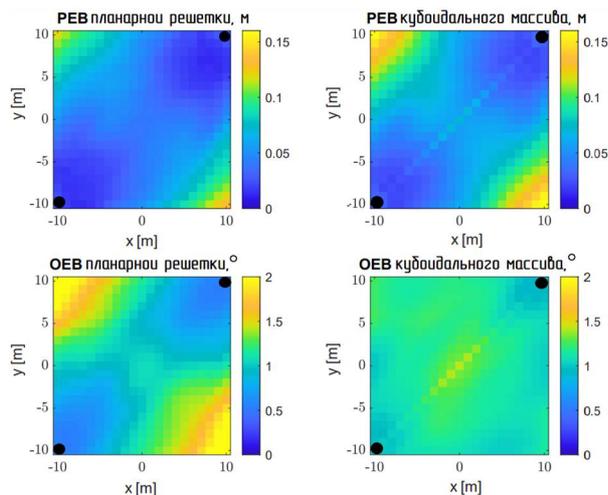


Рис. 3. РЕВ и ОЕВ плоского массива и кубоидального массива в разных положениях. Ориентация UE фиксируется как $\alpha = 0^\circ$, $\beta = -90^\circ$, $\gamma = 45^\circ$ (обращено вверх), а высота зафиксирована на уровне 0 м. Местоположения BSS отмечены черными точками.

На протяжении всего моделирования мы устанавливали нормальное направление массива как положительное направление оси x в его локальной системе координат, как показано на рис. 1. Мы рассматриваем вариант с $M = 2$ BSS, расположенных на $[-10.5, -10.5, 5]^T$ и $[10.5, 10.5, 5]^T$, посылающие сигналы нисходящей линии связи в виде (2) в UE. Ориентация этих двух BSS в углах Эйлера равна $(0^\circ, 90^\circ, 45^\circ)$ и $(0^\circ, 90^\circ, -135^\circ)$ (обращенный вниз), соответственно.

Результаты и обсуждение:

1) Оценка РЕВ / ОЕВ в сравнении с различными положениями UE. Сначала мы проверяем распределение РЕВ и РЕВ по различным положениям UE с фиксированной ориентацией. Ориентация UE устанавливается как $(0^\circ, -90^\circ, 45^\circ)$ (обращена вверх), а высота зафиксирована на уровне 0 м. РЕВ/ОЕВ вычисляется на площади $20 \times 20 \text{ м}^2$ с шагом 1 м, как показано на рис. 3. Мы можем наблюдать, что, в целом, РЕВ становится больше по мере удаления UE от обоих BSS. Для этой конкретной настройки плоский массив, по-видимому, имеет немного меньше РЕВ. Это связано с тем, что только подмножество SAs 3D-массива может принимать сигналы LOS от BS. Напротив, все SAs планарного массива имеют LOS соединения с BSS. Для ОЕВ мы наблюдаем, что планарная матрица превосходит кубоидальную матрицу, когда расположена между BSS, в то время как 3D-массив имеет лучший охват. Это можно объяснить тем фактом, что ОЕВ в значительной

степени определяется измерениями АОА. Трехмерное пространственное расположение может дать преимущество при оценке АОА за счет поддержания канала LOS по всей тестовой области. Последнее наблюдение из рис. 3 - это более высокие значения РЕВ и РЕВ для кубовидной решетки (относительно окружающей области) в положениях, которые находятся ниже (диагональной) линии, соединяющей два BSS. В этих положениях каждый BS может видеть только два UE SAs, поскольку UE имеет поворот на 45° в горизонтальной плоскости. В других позициях всегда есть три SAs, которые могут быть показаны каждому BS.

2) Оценка РЕВ / ОЕВ в сравнении с различными ориентациями UE. Во втором испытании мы исследуем распределение РЕВ и ОЕВ по различным ориентациям UE для фиксированного положения UE в $[0, 0, 0]^T$. Мы поворачиваем UE поперек β , γ в диапазоне $[0^\circ, 360^\circ]$ с размером шага 5° , и фиксируем $\alpha = 0^\circ$. На рис. 4 показаны соответствующие результаты. Из этого рисунка можно сделать вывод, что в среднем 3D-массив существенно превосходит 2D-массив с точки зрения охвата локализации. На самом деле, существуют только очень маленькие области, где две конфигурации сопоставимы (например, около $\beta = 270^\circ$). Когда β составляет около 90° , плоская матрица не имеет доступа ни к одному из BS; следовательно, как локализация, так и связь невозможны (что указано белой областью). Когда UE может установить соединение LOS только с одним из двух BSS, локализация невозможна без синхронизации или многолучевого распространения, и остается только функция связи (области, представляющие собой замкнутые выпуклые кривые центральной и боковых частей на изображении РЕВ и ОЕВ планарного массива). С другой стороны, производительность кубовидной матрицы довольно стабильна во всех тестовых углах.

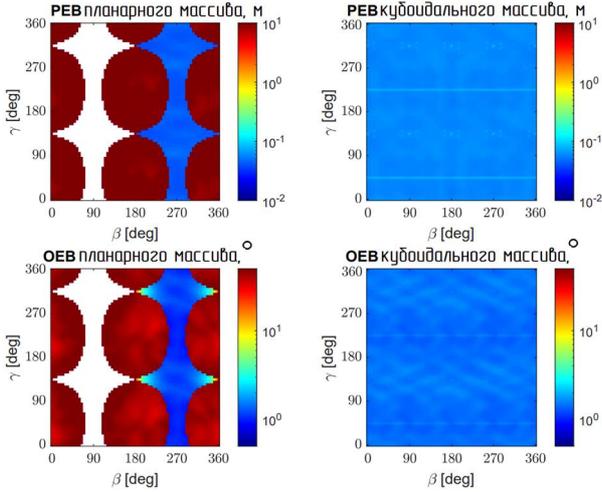


Рис. 4. РЕВ и ОЕВ плоского массива и кубоидального массива в разных ориентациях. Положение UE фиксируется в $[0, 0, 0]^T$

3) Оценка покрытия. Наконец, мы тестируем охват локализации конфигураций 2D и 3D массивов, определенных в (23). Положение и ориентация UE's распределены равномерно; а именно, $x, y \sim U(-10, 10)$, $z \sim U(0, 5)$ и $\alpha, \beta, \gamma \sim U(0, 360)$. Чтобы дать точное представление о пороге РЕВ/ОЕВ's с охватом в разном порядке величины $\{90\%, 99\%, 99.9\%, \dots\}$ (т.е. отключение в разном порядке величины $\{10\%, 1\%, 0.1\%, \dots\}$), мы демонстрируем $1 - C_p$ и $1 - C_o$ при разных пороговых значениях ξ_p и ξ_o , что является эмпирической дополнительной суммарной функцией распределения (CCDF). Мы тестируем CCDF для случаев, когда в системе имеется $M = \{2, 3, 4\}$ BSs. Для случая 3 BSs мы добавляем один BS в местоположении $[-10.5, 10.5, 5]^T$ с ориентацией $(0^\circ, 90^\circ, -45^\circ)$. Для случая 4 BSs мы добавляем еще один BS в местоположении $[10.5, -10.5, 5]^T$ с ориентацией $(0, 90^\circ, 135^\circ)$. Мы используем 10000 испытаний для вычисления РЕВ и ОЕВ и построения кривой CCDF, как показано на рис. 5. Мы наблюдаем, что плоская матрица выходит из строя в 10% случаев. Как объяснялось ранее, это связано с отсутствием LOS со всеми BSs. Мы также можем наблюдать, что в качестве примера для случая 4 BSs и покрытия 90% мы имеем РЕВ в пределах около 0,1 м, используя кубоидальную матрицу, в то время как плоская матрица дает РЕВ в пределах более 10 м. Это показывает, что кубоидальный (3D) массив способен обеспечить лучший охват, чем плоский (2D) массив. Как правило, при одном и том же пороге чем больше BS мы разворачиваем, тем ниже время простоя и, следовательно, тем

выше охват, который мы можем получить как для 2D, так и для 3D массивов.

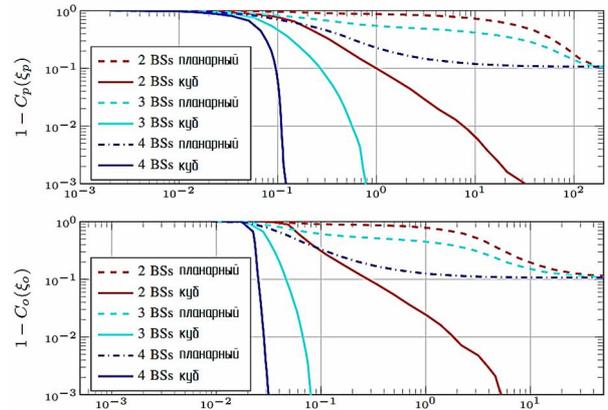


Рис. 5. Эмпирический CCDF PEN (вверху) и ОЕВ (внизу) плоского массива и кубоидального массива при различном количестве BSs

Заключение

В этой статье мы изучили проблему локализации дальней зоны UE, оснащенного 3D-матрицей, в системе связи ТГц-диапазона с несколькими BSs. Мы вывели РЕВ и ОЕВ на основе ограниченной границы Крамера–Рао и определили масштаб локализации для оценки производительности конфигураций 2D и 3D массивов. Основываясь на всестороннем моделировании различных положений и ориентаций UE, мы обнаружили, что кубоидальная матрица может обеспечить лучший охват, в то время как плоская матрица имеет меньшую погрешность в определенных положениях и ориентациях. Эта работа полезна для оптимизации размещения BS и проектирования массивов систем локализации ТГц, которые могут стать потенциальными направлениями будущих исследований.

Приложение А

Выражение матрицы преобразования

Пусть $v = p_U + R_u d_n - p_{B,m}$,

$$s_1 = \left[1 - \left(\frac{u_3^T R_{B,m}^T v}{\|v\|_2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

$$s_2 = \left[1 - \left(\frac{u_3^T R_n^T R_U^T v}{\|v\|_2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

$$\begin{aligned}
 K_1 &= (p_U - p_{B,m})u_2^T R_n^T + \\
 &+ R_U(R_n u_2 d_n^T + d_n u_2^T R_n^T), \\
 K_2 &= (p_U - p_{B,m})u_1^T R_n^T + \\
 &+ R_U(R_n u_1 d_n^T + d_n u_1^T R_n^T), \\
 g &= \text{vec}((p_U - p_{B,m})u_3^T R_n^T + \\
 &+ R_U(R_n u_3 d_n^T + d_n u_3^T R_n^T)).
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(u_1^T R_n^T R_U^T v)K_1 - (u_2^T R_n^T R_U^T v)K_2}{(u_1^T R_n^T R_U^T v)^2 + (u_2^T R_n^T R_U^T v)^2}, \\
 \frac{\partial \varphi_{m,n}^{(el)}}{\partial p_U} &= -s_2 \cdot \left[\frac{R_U R_n u_3}{\|v\|_2} - \frac{u_3^T R_n^T R_U^T v}{\|v\|_2^3} v \right], \\
 \text{vec} \left(\frac{\partial \varphi_{m,n}^{(el)}}{\partial R_U} \right) &= -s_2 \cdot \frac{g}{\|v\|_2} + \\
 &+ s_2 \cdot \frac{u_3^T R_n^T R_U^T v}{\|v\|_2^3} \begin{bmatrix} d_n(1)I_3 \\ d_n(2)I_3 \\ d_n(3)I_3 \end{bmatrix} v,
 \end{aligned}$$

Тогда в соответствии с (3)–(7) мы можем вывести:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \theta_{m,n}^{(az)}}{\partial p_U} &= \\
 &= \frac{(u_1^T R_{B,m}^T v)R_{B,m}u_2 - (u_2^T R_{B,m}^T v)R_{B,m}u_1}{(u_1^T R_{B,m}^T v)^2 + (u_2^T R_{B,m}^T v)^2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \theta_{m,n}^{(az)}}{\partial R_U} &= \\
 &= \frac{(u_1^T R_{B,m}^T v)R_{B,m}u_2 - (u_2^T R_{B,m}^T v)R_{B,m}u_1}{(u_1^T R_{B,m}^T v)^2 + (u_2^T R_{B,m}^T v)^2} d_n^T,
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \theta_{m,n}^{(el)}}{\partial p_U} = s_1 \cdot \left[\frac{R_{B,m}u_3}{\|v\|_2} - \frac{(u_3^T R_{B,m}^T v)v}{\|v\|_2^3} \right],$$

$$\text{vec} \left(\frac{\partial \theta_{m,n}^{(el)}}{\partial R_U} \right) = s_1 \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{\text{vec}(R_{B,m}u_3 d_n^T)}{\|v\|_2} - \frac{u_3^T R_{B,m}^T v}{\|v\|_2^3} \begin{bmatrix} d_n(1)I_3 \\ d_n(2)I_3 \\ d_n(3)I_3 \end{bmatrix} v \right],$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \varphi_{m,n}^{(az)}}{\partial p_U} &= \\
 &= \frac{(u_1^T R_n^T R_U^T v)R_U R_n u_2 - (u_2^T R_n^T R_U^T v)R_U R_n u_1}{(u_1^T R_n^T R_U^T v)^2 + (u_2^T R_n^T R_U^T v)^2},
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \varphi_{m,n}^{(az)}}{\partial R_U} =$$

$$\frac{\partial \tau_{m,n}}{\partial p_U} = \frac{1}{c} \cdot \frac{v}{\|v\|_2}, \quad \frac{\partial \tau_{m,n}}{\partial p_U} = 1,$$

$$\text{vec} \left(\frac{\partial \tau_{m,n}}{\partial R_U} \right) = \frac{1}{c} \cdot \begin{bmatrix} d_n(1)I_3 \\ d_n(2)I_3 \\ d_n(3)I_3 \end{bmatrix} \cdot \frac{v}{\|v\|_2}.$$

Литература

1. Применение технологии виртуальных антенных решёток для минимизации влияния характеристик почв на качество пеленгации / Е.А. Ищенко, О.Ю. Макаров, Ю.Г. Пастернак, С.М. Федоров // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. Междунар. науч. конф. Воронеж: ООО "Вэлборн", 2022. С. 453-458.
2. Применение ММО-радаров для точного обнаружения целей и оценки их параметров / Н.В. Астахов, А.С. Бадаев, О.Ю. Макаров и др. // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 6. С. 23-26. DOI 10.18127/j00338486-202106-04.
3. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, О.Е. Журилова, О.Ю. Макаров // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6(8). С. 109-112. DOI 10.18127/j00338486-201906(8)-03.
4. Помехоустойчивое кодирование в современных форматах связи / А.В. Башкиров, Л.Н. Никитин, И.С. Бобылкин, А.С. Костюков, О.Ю. Макаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 132-138 с.
5. Методы помехоустойчивого обнаружения сигналов в многоантенных системах ММО с пространственным мультиплексированием / О.Н. Чирков, М.А. Ромашенко, И.С. Бобылкин и др. // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2019. Т. 2. С. 85-87.
6. Свиридова И.В., Бобылкин И.С., Чирков О.Н. Оптимизация оценки многолучевого канала радиосвязи с OFDM // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2018. Т. 2. С. 131-133.
7. Бобылкин И.С., Остроумов И.В., Савинков А.Ю. Определение защитных отношений в телекоммуникационных устройствах, использующих

фазо- и частотно-манипулированные сигналы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 84-86.

8. Башкиров А.В., Ситников А.В., Хорошайлова М.В. Оптимизация аппаратной архитектуры LDPC-декодера, применяемого в стандарте радиосвязи IEEE 802.11N // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 97-99.

9. Метод расчета радиочастотных помех на основе передаточной функции / А.В. Башкиров, А.С. Демихова, Н.В. Астахов и др. // Вестник Воронежского

государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 1. С. 50-55. DOI 10.36622/VSTU.2021.17.1.007.

10. Метод оценки параметров канала передачи данных, реализованного по технологии многолучевого мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM-MIMO) / А.В. Башкиров, О.Ю. Макаров, А.С. Демихова и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 92-97. DOI 10.36622/VSTU.2020.16.5.013.

Поступила 02.11.2022; принята к публикации 13.12.2022

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fab7@mail.ru

Бобылкин Игорь Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bobylkin@bk.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>

Кузёмкин Андрей Александрович – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: andreyhillsa@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-8862>

Тимошилова Виктория Романовна – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: timoshilova.vika@yandex.ru

LOCALIZATION COVERAGE ANALYSIS OF THz COMMUNICATION SYSTEMS WITH A 3D ARRAY

A.V. Bashkirov, I.S. Bobylkin, A.A. Kuzyemkin, V.R. Timoshilova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers the problem of assessing the position and orientation of a user equipped with a three-dimensional (3D) array receiving terahertz signals of the far zone via a downlink from several base stations with known positions and orientations. We derived the Kramer–Rao boundary for localization of the problem and determine the coverage of the system under consideration. We compared the distributions of the lower margin of error of a traditional planar matrix and configurations of a three-dimensional matrix at different positions and orientations of user equipment (UE). Our numerical results obtained for array configurations with an equal number of elements show a very limited coverage of the planar array configuration, especially in the UE orientation range. Conversely, the three-dimensional array configuration offers generally higher coverage with negligible performance loss in certain UE positions and orientations. During the analysis, we carried out work to find the boundaries of position errors (PEB) and orientation (OEB), with the help of which a quantitative assessment of the coverage for arrays of two-dimensional and three-dimensional configurations was obtained. We also simulated a single base station (BS), which compares PEB and OEB in different positions and orientations, as a result of which we estimated the THz coverage.

Key words: 3D array, localization, THz communication, constrained CRB, coverage.

References

1. Ishchenko E.A., Makarov O.Yu., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M. “Application of virtual antenna array technology to minimize the influence of soil characteristics on the quality of pelegation”, *Proc. of the Int. Sci. Conf.: Actual Problems of Applied Mathematics, Computer Science and Mechanics (Aktual'nye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki)*, Voronezh, December 13-15, 2021, Voronezh: Valborn, 2022, pp. 453-458.

2. Astakhov N.V., Badaev A.S., Makarov O.Yu. et al. “Application of MIMO radars for accurate target detection and evaluation of their parameters”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 23-26. DOI 10.18127/j00338486-202106-04.

3. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.E., Makarov O.Yu. “Time-frequency analysis of non-stationary signals by methods of wavelet transform and window Fourier transform”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6(8), pp. 109-112. DOI 10.18127/j00338486-201906(8)-03.

4. Bashkirov A.V., Nikitin L.N., Bobylkin I.S., Kostyukov A.S., Makarov O.Yu. "Noise-resistant coding in modern communication formats", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 132-138.
5. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S. et al. "Methods of noise-resistant detection of signals in multi-antenna MIMO systems with spatial multiplexing", *Proc. of the Int. Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo)*, Penza State University, 2019, vol. 2, pp. 85-87.
6. Sviridova I.V., Bobylkin I.S., Chirkov O.N. "Optimization of evaluation of a multipath radio communication channel with OFDM", *Proc. of the Int. Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo)*, Penza State University, 2018, vol. 2, pp. 131-133.
7. Bobylkin I.S., Ostroumov I.V., Savinkov A.Yu. "Determination of protective relations in telecommunication devices using phase- and frequency-manipulated signals", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 84-86.
8. Bashkirov A.V., Sitnikov A.V., Khoroshaylova M.V. "Optimization of the hardware architecture of the LDPC decoder used in the IEEE 802.11N radio communication standard", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 97-99.
9. Bashkirov A.V., Demikhova A.S., Astakhov N.V. et al. "The method of calculating radio frequency interference based on the transfer function", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 1, pp. 50-55. DOI 10.36622/VSTU.2021.17.1.007.
10. Bashkirov A.V., Makarov O.Yu., Demikhova A.S. et al. "The method for estimating the parameters of a data transmission channel implemented using multipath multiplexing technology with orthogonal frequency division of channels (OFDM-MIMO)", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5, pp. 92-97. DOI 10.36622/VSTU.2020.16.5.013.

Submitted 02.11.2022; revised 13.12.2022

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fab7@mail.ru

Igor' S. Bobylkin, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bobylkin@bk.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>

Andrey A. Kuzyemkin, MA, Voronezh State Technical University (Dr. Sci. (Technical)), e-mail: andreyhillsa@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-8862>

Viktoriya R. Timoshilova, MA, Voronezh State Technical University (Dr. Sci. (Technical)), e-mail: timoshilova.vika@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА УЗЛА НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА

Н.В. Ципина, Р.Н. Хорошайлов, И.А. Турецкий

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описывается метод, сочетающий байесовскую оптимизацию (БО) с моделью тепловой сети с сосредоточенными емкостями, который эффективен для оптимизации теплового режима узлов печатной платы. По мере того, как электронные устройства становятся все меньше и сложнее, возрастает важность оптимизации конструкции для обеспечения эффективного отвода тепла. Однако такая оптимизация конструкции затруднена, поскольку необходимо учитывать различные ограничения, связанные с расположением и различным температурным режимом компонентов, выделяющих тепло. Это исследование направлено на повышение производительности и оптимизации теплового режима с помощью нейронных сетей. Байесовская оптимизация, использующая Гауссовский процесс, была объединена с моделью тепловой сети с сосредоточенными емкостями, и была проверена ее производительность. В результате БО получена идеальная схема расположения элементов на печатной плате. В результате выполнения БО удается получить идеальное размещение элементов примерно за 1/150–1/90 времени вычисления. Кроме того, БО нашла оптимальное решение примерно за 7 минут из 10 миллионов возможных вариантов компоновки. Было подсчитано, что это составляет 1/1000 процессорного времени, необходимого для анализа всех шаблонов компоновки

Ключевые слова: байесовская оптимизация, печатная плата, модель тепловой сети, нагревательный элемент

Введение

Задача обеспечения теплового режима радиоэлектронных устройств (РЭУ), например, узлов на печатной плате (ПП), является важной составляющей при проектировании наземных радиоэлектронных средств (РЭС). Для решения этой задачи используется моделирование тепловых режимов [1,2], на основе которого возможно проводить и их оптимизацию по различным критериям [2]. Оптимизация является наиболее эффективным способом улучшения тепловых характеристик РЭУ. Для проведения такой оптимизации, которая относится к классу структурной, необходимо использовать соответствующие алгоритмы [3]. В качестве одного из таких эффективных алгоритмов здесь предлагается использовать Байесовскую оптимизацию для размещения элементов на печатной плате, основанную на моделировании температуры нестационарного состояния и учитывающую временные изменения мощности нагрева и температуры компонентов.

Постановка задачи

Для моделирования теплового режима печатной платы и определения температур компонентов использовалась модель с сосредоточенными параметрами, представленная в

виде эквивалентной схемы (метод электро-тепловой аналогии) [1,2] (от англ. Thermal network model, TNM). Это модель, основанная на сходстве между электрическими цепями и теплопередачей, широко используется при моделировании тепловых систем.

На рис. 1 показана модель печатной платы, подлежащая оптимизации. Выбраны пять тепловыделяющих микросхем. Размеры, максимальная мощность нагрева и суммарная энергия нагрева (для $0 \leq t \leq 1800$) печатной платы и каждой микросхемы приведены в табл. 1.

Таблица 1
Спецификация компонентов модели печатной платы

	Размеры (мм)	Максимальная мощность нагрева (Вт)	Суммарная тепловая энергия (Втч)
Плата	210 × 150 × 1	N/A	N/A
Элемент А	30 × 30 × 10	4,1	1,54
Элемент В	30 × 30 × 10	4,0	1,25
Элемент С	30 × 30 × 10	3,8	1,03
Элемент D	30 × 30 × 10	3,0	0,83
Элемент Е	30 × 30 × 10	2,0	0,50

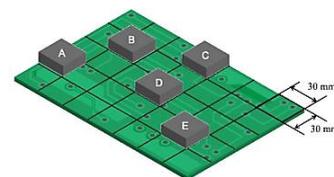
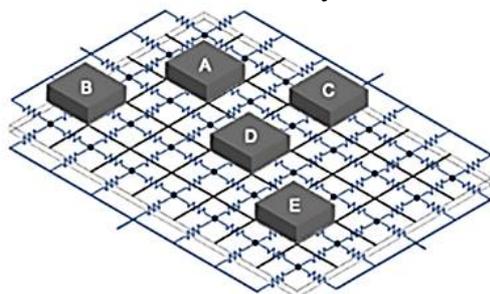


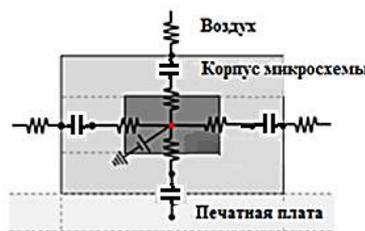
Рис. 1. Модель печатной платы (ПП), содержащая пять нагреваемых микросхем (А-Е)

На рис. 2 (а) показана модель тепловой сети с сосредоточенной емкостью печатной платы, размером 5×7 вычислительных узлов.



а)

На рис. 2 (б) показан TNM нагревательного узла.



б)

Рис. 2. Модель тепловой сети с сосредоточенными емкостями печатной платы

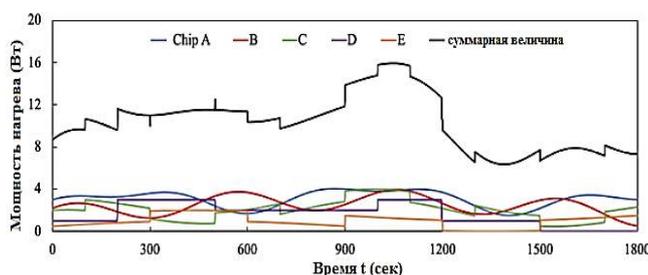


Рис. 3. Временные изменения мощности нагрева пяти нагревательных микросхем (А-Е) на печатной плате

Теплофизические свойства компонентов модели обобщены в табл. 2.

Таблица 2

Теплофизические свойства компонентов модели печатной платы

	Плата	Набор микросхем	Ядро микросхемы
Материалы	Алюминий	Эпоксидная смола	Кремний
Удельная теплоемкость [Дж/гК]	0,9	1,5	0,77
Плотность [г/см ³]	2,7	1,2	2,3
Проводимость [Вт/м·°C]	170	0,3	156

Как показано на рис. 3, предполагалось, что мощность нагрева каждой микросхемы менялась со временем. Каждый кристалл имеет разные изменяющиеся во времени характеристики, общую мощность нагрева, которая представляет собой сумму мощности нагрева каждой микросхемы (черная линия), и достигает максимума в момент времени $t = 1047$ сек.

В TNM температура в n-м узле вычисляется как [3]:

$$\sum_{i=1}^I Q_i = \frac{dT_n}{dt} m_n c_n, \quad (1)$$

где Q_i [Вт] - количество тепла, поступающего от соседних узлов, l - количество соседних узлов, T_n [°C] - температура, t [сек] - время, m_n [кг] - масса, c_n [Дж/кг·°C] - удельная теплоемкость, а нижний индекс указывает количество узлов. Q_i рассчитывается как

$$Q_i = \frac{\Delta T_i}{R_i}, \quad (2)$$

где T_i [°C] - разность температур между n-м узлом и соседним узлом, R_i [Вт/°C] - тепловое сопротивление с учетом проводимости и конвекции.

Для точной характеристики тепловых свойств компонентов необходимо учитывать тепловое сопротивление с учетом проводимости и конвекции и тепловую емкость на единицу длины, которые вычисляются по уравнениям:

$$R_{conv} = \frac{1}{hA}, \quad R_{cond} = \frac{d}{\lambda A}, \quad C_{th} = c_n \rho b A, \quad (3)$$

где R_{conv} [°C /Вт] - тепловое сопротивление конвекции, R_{cond} [°C /Вт] - тепловое сопротивление проводимости, h [Вт/м²·°C] - коэффициент теплопередачи, λ [Вт/м·°C] - теплопровод-

ность, $A[m^2]$ - площадь теплопередачи, а $d [m]$ - это расстояние между узлами, $\rho [kg/m^3]$ — плотность материала, $b[m]$ - толщина элемента.

Предполагалась естественная конвекция с $h = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$ на всех границах плата-воздух и микросхема-воздух. Предполагается, что основание и боковые стороны платы являются адиабатическими. В этом исследовании вкладом радиационного теплообмена пренебрегаем, чтобы упростить имитационную модель.

Эта модель была реализована в MATLAB / Simulink, и было выполнено моделирование

нестационарной теплопередачи для получения характеристик изменения температуры каждого узла. Температура микросхемы определяется как средняя температура по узлам внутри микросхемы. На рис. 4 показан TNM в MATLAB/Simulink. На рис. 4(а) показан TNM печатной платы с нагревательными элементами, в которой компоненты микросхемы подключены к сети в их положениях на печатной плате. На рис. 4(б) показан TNM микросхемы.

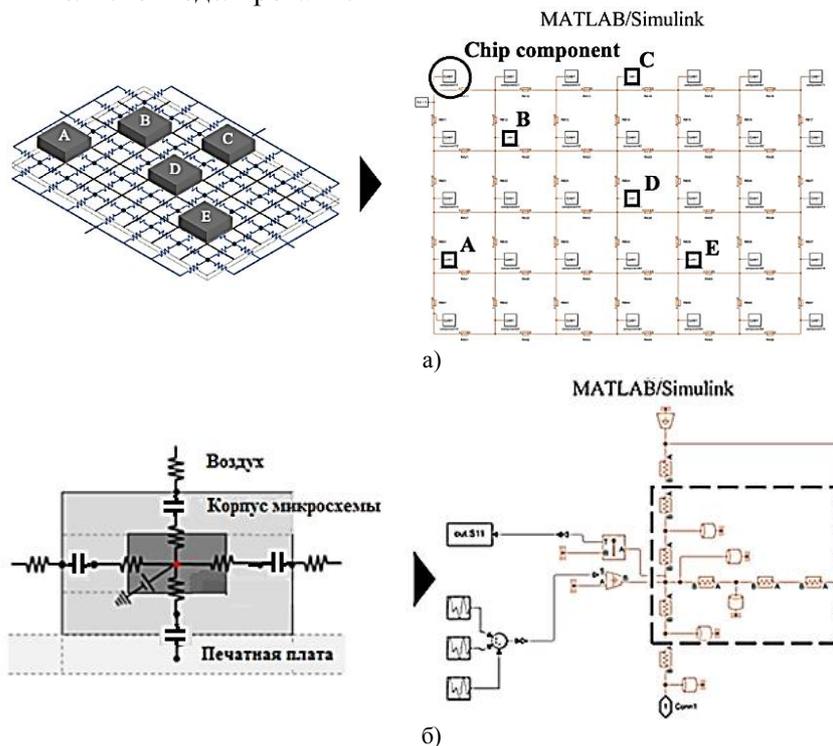


Рис. 4. Реализация модели тепловой сети в MATLAB/Simulink

Этот метод позволяет изменять компоновку печатной платы с меньшими вычислительными затратами. Кроме того, MATLAB помогает быстро решать несколько одновременных линейных уравнений, заданных с помощью уравнения 1, способствуя быстрому вычислению явления нестационарной теплопередачи.

Целью оптимизации является размещение элементов на печатной плате, то есть схема размещения пяти микросхем с переходным нагревом от А до Е. В реальной модели могут существовать ограничения на размещение элементов в зависимости от функций устройств. Чтобы смоделировать эту ситуацию, заданы два ограничения на размещение элементов:

- площадь размещения для каждого элемента;
- расстояние между элементами.

В первом ограничении каждый элемент может быть помещен только в сетку, определяемую границами рамки, как показано на рис. 5. Другими словами, каждый элемент может быть размещен только в пределах определенной области.

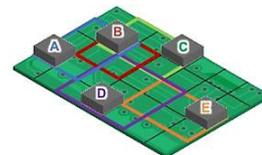


Рис. 5. Первое ограничение: границы рамки показывают область размещения для каждой фишки

В соответствии со вторым ограничением расстояние между узлами в центре элементов должно быть меньше или равно значениям, указанным в табл. 3.

Таблица 3
Расстояние между элементами

	Максимальное расстояние между элементами (мм)
Элементы А-В	90
Элементы В-С	90
Элементы А-Д или Д-Е	90

Например, на рис. 4 расстояние между микросхемами А и В составляет 51,96 мм, что соответствует ограниченному значению (90 мм).

Оптимизация проводится таким образом, чтобы минимизировать значение следующей целевой функции $f(x)$

$$f(x) = w \max\{T_{\text{mean}}(t)\} + (1 - w) \max T_{\text{high}}(t) \quad (4)$$

где x указывает на один из вариантов компоновки печатной платы. $T_{\text{mean}}(t)$ - средняя температура микросхемы, то есть средняя температура элемента по пяти микросхемам в момент времени t ; $T_{\text{high}}(t)$ - самая высокая температура микросхемы среди пяти элементов в момент времени t ; \max - максимальное значение за период времени моделирования ($0 \leq t \leq 1800$ с); w - весовой коэффициент; при этом оптимизация выполняется для трех случаев, а

именно: $w = 1,0$ и $0,5$. Эта методология называется методом взвешенной суммы и обычно используется для многофункциональной оптимизации [4]. Целевая функция для $w = 1,0$ и $0,5$ равна

$$f(x) = \max\{T_{\text{mean}}(t)\}, \quad f(x) = \max\{T_{\text{height}}(t)\} \quad \text{и} \quad f(x) = [\max\{T_{\text{mean}}(t)\} + \max\{T_{\text{high}}(t)\}] / 2, \quad \text{соответственно.}$$

Проверка работоспособности имитационной модели

Перед выполнением оптимизации и для подтверждения достоверности настоящего TNM с сосредоточенной емкостью было проведено трехмерное (3D) моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в рамках той же модели и условий. Полученные результаты были сопоставлены с результатами, полученными TNM. Для моделирования с использованием метода конечных элементов использовалось коммерческое программное обеспечение ANSYS. Количество вычислительных сеток, используемых в модели МКЭ, было установлено равным 3630. Напротив, количество вычислительных узлов в TNM равно 95. Сравнение результатов МКЭ и TNM показано на рис. 6 и 7.

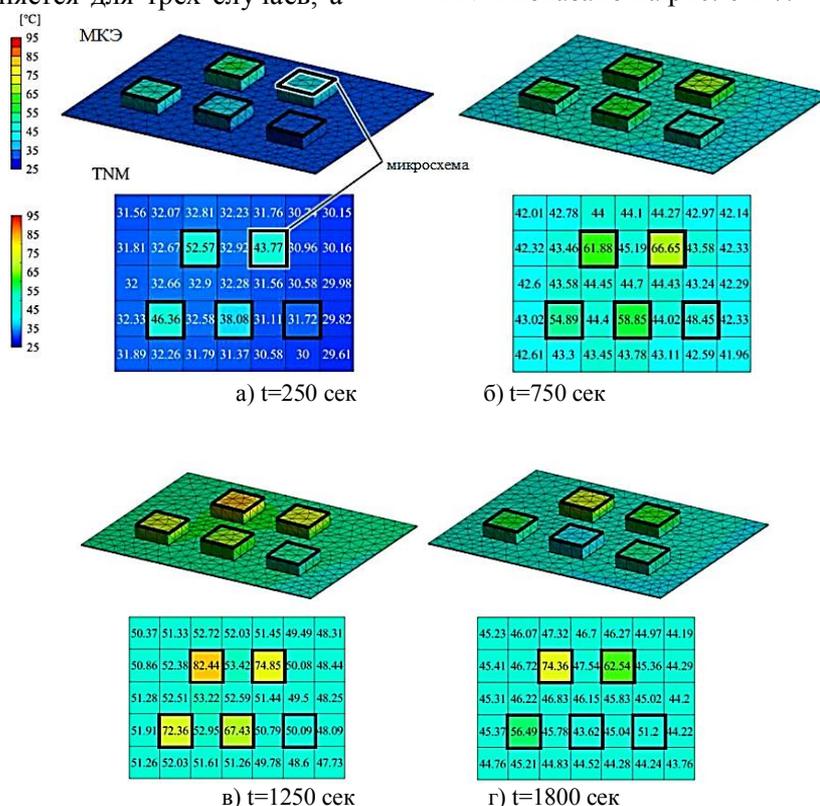


Рис. 6. Сравнение смоделированных распределений температуры между МКЭ и TNM при $t = 250$ с, 750 с, 1250 с и 1800 с

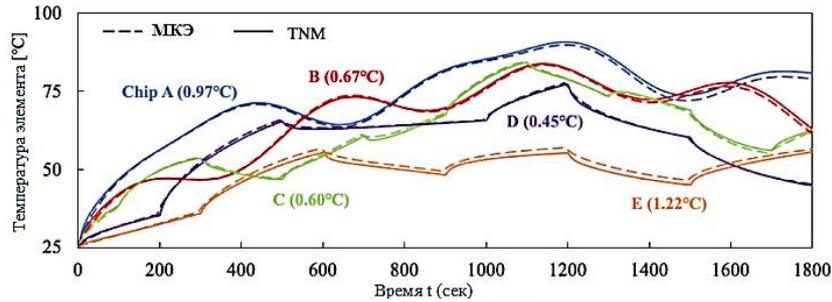


Рис. 7. Сравнение моделируемой температуры микросхемы между МКЭ, с указанием среднеквадратичной ошибки между МКЭ и ТММ для каждого нагревательного элемента (в скобках)

На рис. 6(а)–(г) показаны результаты МКЭ и TNM распределения температуры за время $t = 250$ сек, 750 сек, 1250 сек и 1800 сек соответственно. Результаты TNM отображают среднюю температуру по узлам поверхности внутри каждой сетки.

Для более точного сравнения на рис. 7 показано сравнение изменения температуры элемента во времени для обоих случаев. Среднеквадратичная ошибка между температурными характеристиками микросхемы, полученными с помощью TNM и МКЭ для каждого элемента, колеблется в пределах $0,45\text{—}1,12^\circ\text{C}$. Эти результаты показывают, что модель тепловой сети с сосредоточенной емкостью обладает достаточной достоверностью для оптимизации компоновки элементов печатной платы, хотя пространственное распределение температуры ниже, чем при моделировании с использованием МКЭ. Более того, вычислительное время TNM было примерно в 10 раз быстрее, чем у МКЭ.

Применение Байесовской оптимизации

Задача оптимизации теплового проектирования может быть сформулирована как оптимизация непрерывных функций черного ящика $f(x)$ следующим образом

$$x = \operatorname{argmin}_x f(x), \quad (5)$$

где x - входная переменная, а $f(x)$ обозначает целевую функцию уравнения (4). Стандартная модель для оптимизации черного ящика основана на гауссовском процессе. Байесовская оптимизация (БО) является популярной системой для оптимизации функции черного ящика благодаря ее эффективности выборки. Гаус-

совский процесс широко применяется для решения реальных задач, таких как прогнозирование тепловых систем, благодаря его способности улавливать нелинейность и количественно определять неопределенность. Гауссовский процесс является обобщением Гауссовского распределения вероятностей. В то время как распределение вероятностей описывает случайные величины, которые являются скалярами или векторами (для многомерных распределений), стохастический процесс управляет свойствами функций. Из-за таких характеристик гауссовский процесс часто выбирается для моделирования неизвестной целевой функции БО.

На рис. 8 представлена блок-схема, описывающая поведение оптимизации гиперпараметров в Гауссовском процессе и показывающая суть метода Байесовской оптимизации.

Согласно рис. 8, в БО $f(x)$ является стохастическим процессом и относится к гиперпараметрам нейронной сети, которые, как предполагается, следуют Гауссовскому процессу, то есть приведенному ниже уравнению

$$f(x) \sim GP(\mu(x), \sigma(x)) = GP(\mu(x), k(x, x')), \quad (6)$$

где $\mu(x)$ - средняя функция (целевой функции в точке x), $\sigma(x)$ - ковариационная функция (целевой функции в точке x), а $k(x, x')$ - функция ядра.

В этом способе апостериорное распределение $f(x)$ вычисляется из наблюдаемых в данный момент данных на основе уравнения 6, и следующая точка поиска определяется с использованием функции сбора данных на основе информации отдаленного прогнозируемого распределения.



Рис. 8. Блок-схема поведения оптимизации гиперпараметров в гауссовом процессе

Результаты оптимизации

На рис. 9 (а) и (б) показаны оптимизированные ПП с расположенными на них элемен-

тами, полученные в результате БО в трех случаях $f(x)$ соответственно.

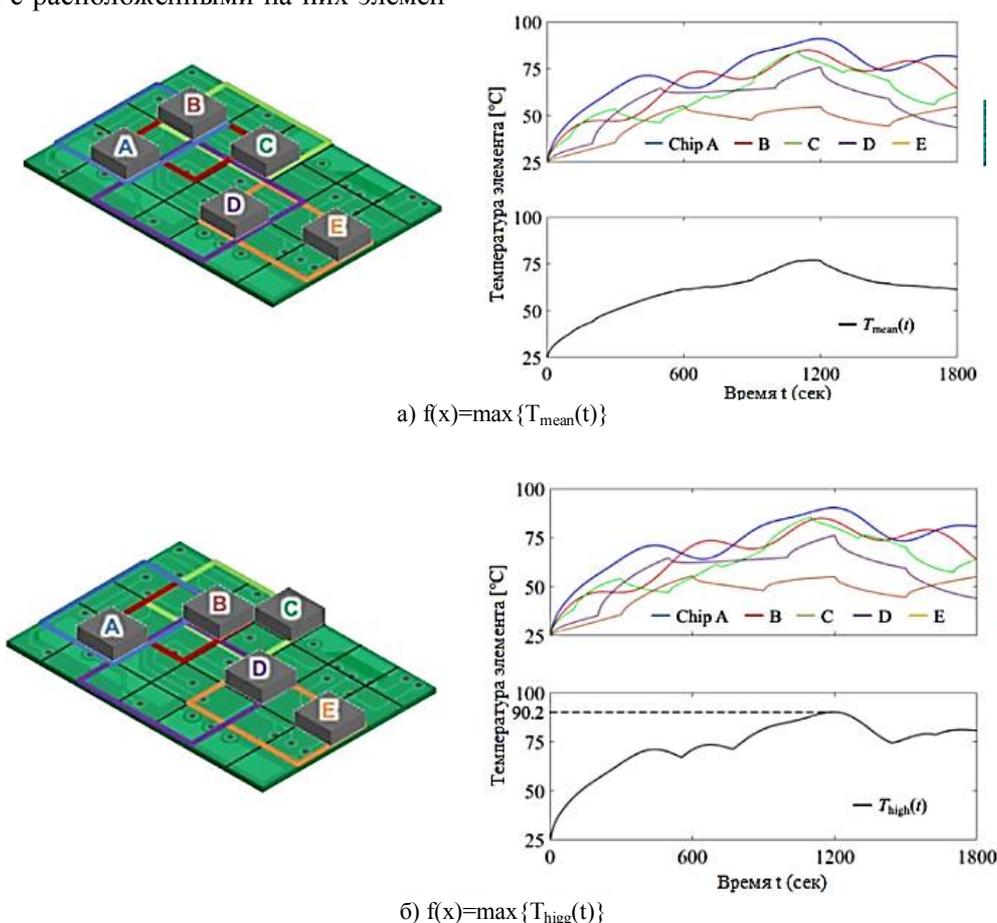


Рис. 9. Сравнение оптимизированных конфигураций компонентов с помощью БО для различных целевых функций

На рисунках также показаны соответствующие изменения температуры во время моделирования для каждой микросхемы

$T_{\text{mean}}(t)$ или $T_{\text{high}}(t)$. На рис. 9 (а) значение $T_{\text{mean}}(t)$ достигает максимального значения приблизительно при $t = 1200$ сек. Это макси-

мальное значение представляет собой температуру микросхемы А, которая имеет наибольшее общее тепловыделение, как показано в табл. 1.

В этом случае, поскольку элементы должны быть равномерно распределены, чтобы свести к минимуму $f(x) = \max\{T_{\text{mean}}(t)\}$, интуитивно достаточно сложно предсказать подобную схему размещения. Напротив, на рис. 9(б), с оптимизацией для минимизации $f(x) = \max\{T_{\text{high}}(t)\}$, элементы В и С расположены близко друг к другу, а элемент А в основном удален от других, что также было бы нелегко предсказать интуитивно. Это указывает на то, что оптимизированные модели являются логичными и что оптимизация теплового проектирования с использованием БО эффективна.

В реальном расчете теплового режима узлов ПП количество вариантов компоновки может быть еще больше. Чтобы проверить эффективность БО в таком случае, БО была при-

менена к расширенной постановке задачи, в которой сняты оба ограничения, приведенные выше. В этом случае число возможных вариантов размещения элементов составляет примерно 10 миллионов. Была выполнена оптимизация для случая $f(x) = \max\{T_{\text{high}}(t)\}$. На рис. 10 показана динамика изменения целевой функции по отношению к числу итераций. Значения $f(x)$ на 20, 200 и 2000 итерациях показаны на графике. На рис. 11 показаны соответствующие оптимизированные варианты размещения и временные изменения температуры микросхемы и максимума (t) для оптимизированной компоновки при 2000 итерациях. Из рис. 9 видно, что значение $f(x)$ обновляется по мере увеличения числа итераций, достигая 90% от значения 2000 итераций. T_{high} при 200 и 2000 итерациях была снижена на 2,79 °C и 2,9 °C, соответственно, по сравнению с T_{high} (90,20 °C) при действии ограничений.

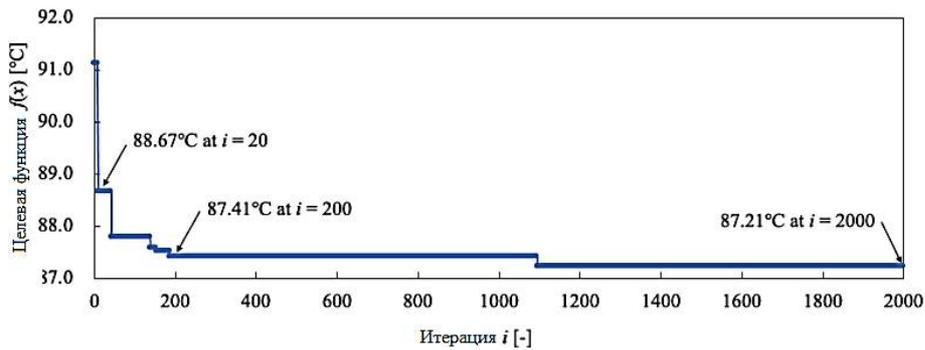


Рис. 10. Процесс оптимизации с БО

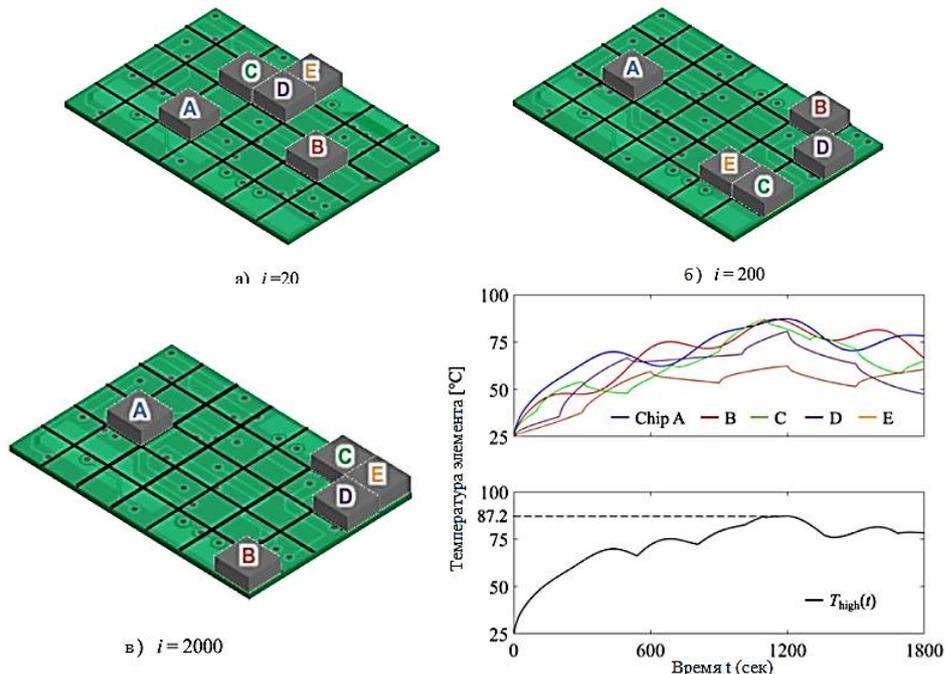


Рис. 11. Оптимизированное размещение компонентов с помощью БО без ограничений

На рис. 11 показано, что элементы А и В расположились на достаточное расстояние друг от друга и от других микросхем, и T_{high} при 200 и 2000 итерациях снижена на 2,79 °С и 2,9 °С, соответственно, по сравнению с T_{high} (90,20 °С) при действии ограничений.

Это связано с тем, что мощности нагрева микросхем А и В больше, чем у других элементов, как показано в табл. 1, поэтому их размещают на большем расстоянии друг от друга до нижней значения T_{high} . Сравнивая температурные изменения на рис. 11 (в) и рис. 9(б), температура элемента А снижается. Время работы микросхемы для 200 и 2000 итераций составило 434 секунд и 16676 секунд, соответственно.

Вычислительное время, необходимое для моделирования поиска по всем возможным вариантам обученной нейронной сети, оценивалось примерно в 140 дней, а с использованием БО можно оптимизировать примерно 1/1000 времени для всех вариантов поисков. Исходя из этих результатов, высокая скорость БО была подтверждена в расширенной постановке задачи. Однако вычислительная сложность БО имеет тенденцию увеличиваться с увеличением числа итераций. Этот факт также был подтвержден результатами моделирования. Вычислительное время для 2000 итераций было в 38 раз больше, чем для 200 итераций.

Эту характеристику следует учитывать при выполнении оптимизации с помощью БО. В данном случае было сочтено, что 200 итераций подходят для получения почти оптимальной модели размещения элементов на ПП.

Заключение

Байесовская оптимизация (БО) в сочетании с сосредоточенной емкостью TNM была применена для оптимальной модели размещения элементов на ПП, и ее эффективность была подтверждена приведенными исследованиями. Чтобы оценить значение целевой функции исследуемой схемы, было выполнено моделирование переходной теплопередачи для

каждого элемента с учетом различных временных изменений мощности нагрева тепловыделяющих элементов. В результате БО достигает идеального размещения элементов примерно за 1/150–1/90 времени вычисления из всех возможных вариантов. Кроме того, БО была применена к расширенной постановке задачи с возможными вариантами компоновки в 10 миллионов. БО нашла разумно лучший вариант компоновки, который достиг 90% значения целевой функции в 2000 итераций примерно за 7 минут. В будущих исследованиях необходимо будет перейти на более реалистичную модель, которая также учитывает более сложные структуры печатных плат, такие как многослойные структуры и контактные тепловые сопротивления между слоями.

Литература

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
2. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
3. Галеев Э.М. Оптимизация. Теория, примеры, задачи: учеб. пособие. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: КомКнига, 2006. 336 с.
4. Moore A.L., Shi L. Emerging challenges and materials for thermal management of electronics, Mater. Today 17 (4) (2014) 163–174
5. Wang H. and Wang H. An analytical circuit based nonlinear thermal model for capacitor banks// Microelectron. Reliab. Vol. 88–90. No. June. pp. 524–527, 201
6. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99–105.
7. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Белецкая С.Ю. Использование стохастического вычисления для реализации недвоичного LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 70–73.
8. Khoroshaylova M.V. LDPC code and decoding algorithms // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности: материалы II-ой междунар. науч.-практ. конф. В 2-х ч./ под ред. Э.П. Комаровой. Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2015. С. 227–228.

Поступила 12.10.2022; принята к публикации 13.12.2022

Информация об авторах

Ципина Наталья Викторовна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tcnv@mail.ru
Хорошайлов Роман Николаевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: hmn3001@mail.ru

Турецкий Иван Андреевич - студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tav7@mail.ru

OPTIMIZATION OF THE THERMAL MODE OF THE NODE ON THE PRINTED CIRCUIT BOARD USING THE BAYESIAN APPROACH

N.V. Tsipina, R.N. Khoroshaylov, I.A. Turetskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article describes a method combining Bayesian optimization (BO) with a model of a thermal network with concentrated capacities, which is effective for optimizing the thermal regime of PCB nodes. As electronic devices become smaller and more complex, the importance of optimizing the design to ensure efficient heat dissipation increases. However, such optimization of the design is difficult, since it is necessary to take into account various restrictions associated with the location and different temperature conditions of the components that emit heat. This research is aimed at improving performance and optimizing the thermal regime using neural networks. Bayesian optimization using a Gaussian process was combined with a model of a heat network with concentrated capacities, and its performance was tested. As a result, BO successfully found the ideal layout of the elements on the printed circuit board. As a result of the BO, it is possible to obtain the ideal placement of elements in about 1/150–1/90 of the calculation time. In addition, BO found the optimal solution in about 7 minutes out of 10 million layout templates. It has been estimated that this amounts to 1/1000 of the CPU time needed to analyze all the layout patterns.

Key words: Bayesian optimization, printed circuit board, heat network model, heating element

References

1. Dul'nev G.N. "Heat and mass transfer in radioelectronic equipment" ("Тепло и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре"), Moscow: Vysshaya shkola, 1984, pp. 150-172.
2. Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. "Methods of calculating the thermal regime of devices" ("Metodi rascheta teplovogo reghima priborov"), Moscow: Radio i svyaz', 1990, pp. 220-246.
3. Galeev E.M. "Optimization. Theory, examples, tasks" ("Optimizatsiya. Teoriya, primery, zadachi"), textbook, Moscow: KomKniga, 2006, 336 p.
4. Moore A.L., Shi L. "Emerging challenges and materials for thermal management of electronics", *Mater. Today*, 2014, no. 17 (4), pp. 163–174
5. Wang H., Wang H. "An analytical circuit based nonlinear thermal model for capacitor banks," *Microelectron. Reliab.*, vol. 88–90, no. June, pp. 524–527, 201
6. Khoroshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.
7. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V., Beletskaya S.Yu. "Use of stochastic computation for realization of non-binary LDPC-decoder on FPGA", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no 5, pp. 70-73.
8. Khoroshaylova M.V. "LDPC code and decoding algorithms", *Proc. of the 2nd Int. Sci.-Prac. Conf.: Anthropocentric Sciences: an Innovative Look at Education and Personal Development (Antropotsentricheskie nauki: innovatsionnyy vzglyad na obrazovanie i razvitie lichnosti)*, 2015, pp. 227-228.

Submitted 12.10.2022; revised 13.12.2022

Information about the authors

Nataliya V. Tsipina, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: tcnv@mail.ru

Roman N. Khoroshaylov, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: hnr3001@mail.ru

Ivan A. Turetskiy, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: tav7@mail.ru

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ ВИТКОВ ПЛАНАРНОЙ ОБМОТКИ**О.Ю. Денисов, А.А. Моисеенко, С.М. Фёдоров****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: целью данной работы является описание методики создания топологии планарных витков, уменьшающей потери, связанные с омическим сопротивлением, основным предметом, рассматриваемым в данной статье, являются потери на активном сопротивлении в витках обмотки, уменьшая их, в свою очередь, приходится и модифицировать витки. При исследовании данной области знания была представлена концепция расчета сопротивления витков, лежащих в одной плоскости, она же была апробирована на моделировании методами конечных элементов. Рассмотрены также основные причины возникновения потерь в топологии витков планарной обмотки, влияние данных потерь на параметры изделий. Большинство инженеров не проводят моделирование топологии витков планарной обмотки, что приводит к проектированию неоптимального варианта обмотки. Показано, что при моделировании дизайна топологии витков можно снизить потери в обмотке, что приводит к увеличению коэффициента полезного действия. На примере силового витка импульсного источника питания показано влияние оптимизации на параметры планарной обмотки. Также на этом примере можно увидеть использование предлагаемой методики и перечень использованного программного обеспечения. По итогу работы были уменьшены активные потери на планарной обмотке на 7,3 % на основе данных теоретических сведений

Ключевые слова: коэффициент полезного действия, планарная обмотка, потери, мощность, модуль электропитания, оптимизация обмотки, топология, витки обмотки, сопротивление обмотки

Введение

При проектировании планарной обмотки проявляется проблема возникновения различного рода потерь. Эта статья посвящена поиску способа минимизации потерь при проектировании. Проблема имеет решающее значение, поскольку в связи с тенденцией к минимизации и увеличению коэффициента полезного действия существует необходимость повышения коэффициента полезного действия планарной обмотки.

КПД – это коэффициент полезного действия, т.е. отношение преобразованной мощности к потребляемой. КПД выражается в виде формулы [1]:

$$\eta = \frac{P_{trans.}}{P_{cons.}} \times 100\% \quad (1)$$

Существует два типа мощности при работе трансформатора: P – активная мощность, Q – реактивная мощность. В инженерных расчетах полная мощность S выражается в виде комплексного числа:

$$S = P + jQ \quad (2)$$

Использование комплексного числа обусловлено тем, что в действительности векторы P и Q отличаются друг от друга на определенный угол, который необходимо учитывать при инженерных расчетах.

Потери можно выразить через коэффициент полезного действия:

$$S_{los} = S_{100\%} - S_{eff}, \quad (3)$$

где S_{los} – мощность потерь,
 $S_{100\%}$ – полная мощность планарной обмотки,
 S_{eff} – эффективная мощность планарной обмотки.

Потери в планарной обмотке бывают двух видов: потери в меди обмотки и перемещение сердечника. В первом случае потерянная энергия рассеивается в виде тепла в окружающую среду. Второй вид не что иное, как потери на гистерезис и на вихревые токи, которые возникают в магнитопроводе. В данной статье рассматривается первый вид потерь – потери в меди обмотки.

Оценим количество потерь в обмотке на примере модуля электропитания ТЕР 200-2412WIR. Характеристики модуля приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики ТЕР2002412WIR

Параметр	Значение
Мощность	200 Вт
КПД	89 %
Выходное напряжение	12 В
Выходной ток	15 А

Определим общее количество потерь N исходя из значения КПД модуля:

$$N = \frac{200\text{Вт}}{0,89} - 200\text{Вт} = 24,7\text{Вт}$$

Так как потери в модуле приходятся не только на обмотку, а например, на силовых ключах, вторичных источниках питания, то принимают приблизительное значение потери на обмотке, равной 9 Вт.

При непрерывной работе модуля электропитания в составе системы на протяжении года рассчитаем количество потерянной энергии в трансформаторе:

$$N = 9\text{Вт} \cdot 8760\text{ч} = 78,84\text{кВт} \cdot \text{ч}$$

Из расчетов следует, что за 1 год у модуля мощностью 200 Вт, с КПД 89% потери составляют 78,84 кВт·ч.

Минимизация данных потерь будет рассмотрена в рамках данной статьи.

Метод оптимизации обмотки

Для разработки топологии планарной обмотки традиционно используется намотка равными по толщине проводниками.

На рис. 1 изображен планарный трансформатор с равной толщиной витков, что приводит к возникновению различных сопротивлений на витках, что, в свою очередь, приводит к возникновению потерь.

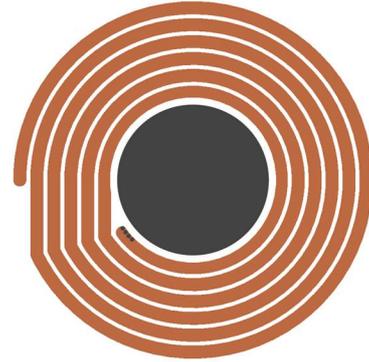


Рис. 1. Планарный трансформатор с равной толщиной витков

Для расчета ширины витка необходимо вычислить требуемое сечение по формуле:

$$D_{pri} = \frac{I_{dsrms}}{J}, \quad (4)$$

где I_{dsrms} – ток, протекаемый в обмотке,
 J – плотность тока.

Ширина витка представляет собой отношение необходимого сечения D_{pri} к толщине материала и выражается формулой:

$$wt_1 = \frac{D_{pri}}{H_{metal}}, \quad (5)$$

где H_{metal} – толщина материала витка.

Количество витков на один слой определяется выражением:

$$Nt_1 = \frac{b_w - 2 \cdot O_{ts} + s}{wt_1 + s}, \quad (6)$$

где b_w – ширина окна сердечника,
 O_{ts} – отступ меди от края печатной платы,
 s – зазор по меди между витками.

Количество необходимых слоев для реализации планарной обмотки представляет собой отношение необходимого количества витков к количеству витков на слой Nt_1 :

$$Sloi_1 = \frac{N_p}{Nt_1}, \quad (7)$$

где N_p – необходимое количество витков.

Для вычисления сопротивления необходимо рассчитать длину проводника планарной обмотки. Для этого нужно определить количество дуг, согласно выражению:

$$N_{arc} = Nt_1 \cdot 2 - 1 \quad (8)$$

Диаметр дуг вычисляется:

$$D_{arc} = wt_1 + 2 \cdot O_{ts} + D_{core}, \quad (9)$$

где D_{core} – диаметр ядра сердечника.

Определив количество дуг и их диаметр, рассчитаем длину проводника планарной обмотки [2]:

$$L = \left(\sum_{m=0}^{N_{arc}} \pi \cdot \left(\frac{D_{arc} + \left(\frac{wt_1}{2} + s \right) \cdot m}{2} \right) \right) \cdot Sloi_1. \quad (10)$$

Зная длину проводника, определяется сопротивление витка планарной обмотки с равномерной толщиной витков:

$$R_{u.t.} = \frac{L \cdot \rho}{D_{pri} \cdot \beta}, \quad (11)$$

где β – число повторений витков,
 ρ – удельное сопротивление меди.

Значение сопротивления приведено в табл. 2.

Оптимизация потерь в меди обмотки осуществляется за счет уравнивания сопротивлений в витках обмотки путем определения толщин и радиусов витков планарной обмотки.

На рис. 2 изображена планарная обмотка с оптимизированной толщиной витков, что уравнивает сопротивление в каждом витке и уменьшает потери меди планарной обмотки.

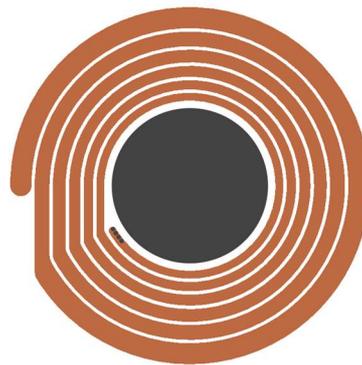


Рис. 2. Планарная обмотка с оптимизированной толщиной витков

Расчетное общее сопротивление по постоянному току каждой многооборотной обмотки с оптимизированной толщиной составляет [4]:

$$R = \sum_{i=0}^{k-1} \frac{2\pi}{\rho \cdot h_{Cu} \cdot \ln(r_{(i+1)}/r_i)}, \quad (12)$$

где k – количество витков,
 h_{Cu} – толщина медного проводника,
 r_i – радиус i -го витка.

Радиус i -го витка определяется по формуле:

$$r_i = \sqrt[k]{r_0^{(k-i)} r_k^i}, \quad (13)$$

где r_0 – радиус до 1-го витка.

Эта оптимизированная конструкция может быть реализована как для высоковольтных обмоток, так и для низковольтных, поскольку обмотка является одним из факторов эффективности и потерь, создается тестовая модель для проверки оптимизации радиусов спирали и ожидаемых сопротивлений обмотки. Модель была изготовлена как для оптимального варианта, так и неоптимального с помощью программы FEMM с погрешностью между измеренными и рассчитанными FEM значениями менее 2%. После оптимизации обмотки и проверки модели потерь можно переходить на следующий этап оптимизациимоточного изделия, например, к такому как проектирование сердечника и оптимизация потерь внутри него.

Моделирование

В качестве объекта исследования был выбран ферритовый сердечник EQ30 от компании TDK. Внешний вид и габаритные размеры сердечника приведены на рис. 3.

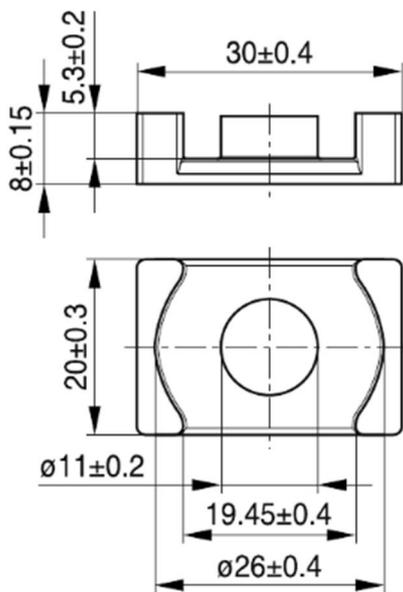


Рис. 3. Внешний вид и габаритные размеры сердечника EQ30

Входные данные параметров для моделирования в среде FEMM [3] приведены в табл. 2.

Таблица 2

Входные данные для FEMM

Параметр	Значение
Материал	медь
Толщина материала	0,035 мкм
Расчетный ток	10А

Эпюры моделирования приведены на рис. 4-7.

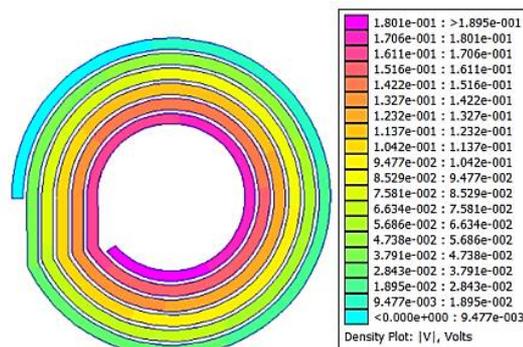


Рис. 4. Распределение потенциала по витку в классическом варианте топологии витков

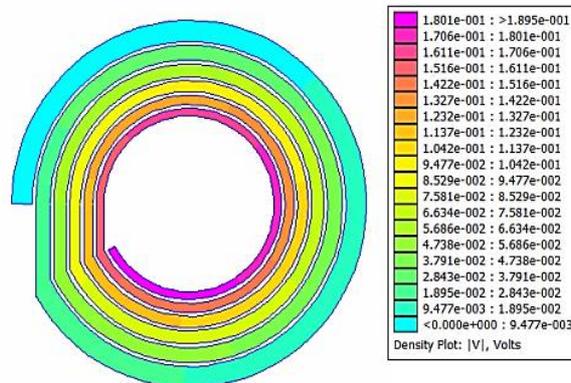


Рис. 5. Распределение потенциала по витку в оптимизированном варианте топологии витков

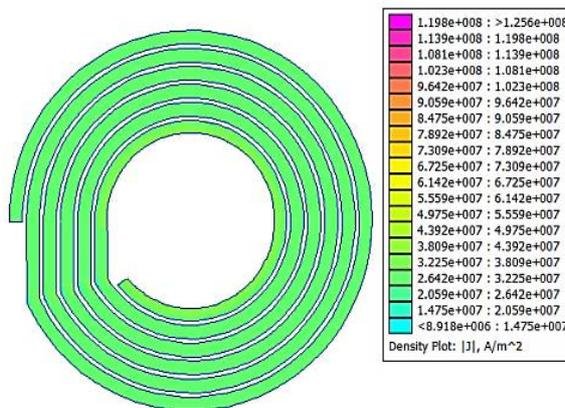


Рис. 6. Распределение по току в классическом варианте топологии витков

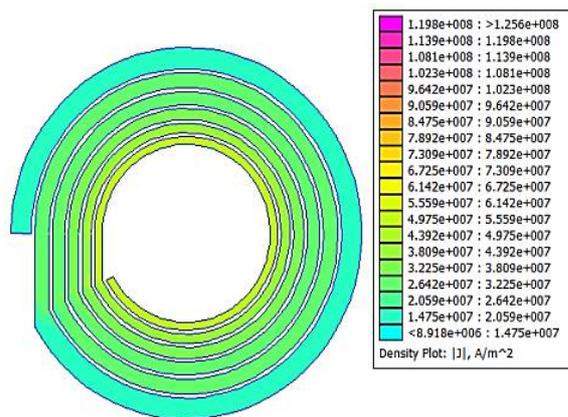


Рис. 7. Распределение по току в оптимизированном варианте топологии витков

При сравнении распределений по току в витке в классическом варианте топологии и в оптимизированном варианте видно, что в первом случае плотность тока распределена равномерно по виткам. Во втором случае - схожа с распределением тока в одном планарном витке, занимающим все предоставленное место.

Исходя из рис. 4-7 можно определить сопротивление и мощность потерь в витках планарного трансформатора. Значения приведены в табл. 3.

Таблица 3
Результаты моделирования

Параметр	Значение	
	Равная толщина витков	Оптимизированная толщина витков
Сопротивление	0,185 Ом	0,179 Ом
Потери	18,5 Вт	17,9 Вт

Количество потерь, которые удалось сократить, составляет:

$$P = P_{st} - P_{opt} = 18,5 - 17,9 = 0,6 \text{ Вт}$$

При пересчете на один год количество годовой экономии мощности составляет:

$$P_{year} = P \cdot \text{Вт} \cdot 8760 \cdot \text{ч} = 5,26 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Заключение

Используемая методика, состоящая из аналитических вычислений и дополненная МКЭ [5], помогла оптимизировать активные потери в планарной обмотке, что, в свою очередь, помогает увеличить КПД конечного изделия. Данная методика поможет уже на этапе проектирования намотки отказаться от большого числа макетов дросселей и от огромной работы, связанной с измерением их характеристик. Возможность автоматизации расчетов ускорит разработку новых силовых приборов. Нужно также отметить, что используемое программное обеспечение с открытым исходным кодом, и это в значительной мере снижает затраты на приобретение программного обеспечения как для предприятий, так и для учебных заведений.

Оптимизированная топология обмотки позволяет повысить значение коэффициента полезного действия и сократить потери мощности на 5,26 кВт·ч в год. На примере ТЕР2002412WIR видно, что при годовом использовании модуля электропитания потери составляют 78,84 кВт·ч. Сокращение потерь в обмотке составляет 7,3%.

Литература

1. URL: <https://www.el-info.ru/koeffitsient-poleznogo-dejstviya-transformatora>.
2. Моисеенко А.А., Фёдоров С.М. Методика нахождения потерь в обмотке дросселя вследствие скин-эффекта и эффекта близости// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 6. С. 87-94.
3. Веретенников Н.Ю., Моисеенко А.А. Методика расчета и оптимизации высокочастотных потерь в магнитных компонентах// Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXVII Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию полетов в космос Ю.А. Гагарина и Г.С. Титова. В 4 т. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2021. С. 185-193.
4. Knabben, Gustavo C., Grayson Zulauf, Jannik Schäfer, Johann W. Kolar, Matthias J. Kasper, Jon Azurza Anderson, and Gerald Deboy. 2021. "Conceptualization and Analysis of a Next-Generation Ultra-Compact 1.5-kW PCB-Integrated Wide-Input-Voltage-Range 12V-Output Industrial DC/DC Converter Module" Electronics 10, no. 17: 2158.
5. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2005. 335 с.

Поступила 21.08.2022; принята к публикации 13.12.2022

Информация об авторах

Денисов Олег Юрьевич – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: denivuk.oleg@yandex.ru

Моисеенко Алексей Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: viktori_buh@mail.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-616>

METHODOLOGY OPTIMIZATION OF THE TOPOLOGY OF THE TURNS OF THE PLANAR WINDING

O.Yu. Denisov, A.A. Moiseenko, S.M. Fyedorov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the purpose of this work is to describe the methodology for creating the topology of planar turns, which reduces the losses associated with ohmic resistance, the main subject considered in this article is the losses on active resistance in the turns of the winding, reducing them, in turn, one have to modify the turns. In the study of this area of knowledge, the concept of calculating the resistance of turns lying in the same plane was presented, it was also tested on modeling by finite element methods. The main reasons for the occurrence of losses in the topology of the turns of a planar winding, the influence of these losses on the parameters of products are also considered. Most engineers do not model the topology of the turns of a planar winding, which leads to the design of a suboptimal winding option. It is shown that when modeling the design of the topology of the turns, it is possible to reduce the losses in the winding, which leads to an increase in the efficiency. On the example of a power coil of a switching power supply, the influence of optimization on the parameters of a planar winding is shown. Also in this example, you can see the use of the proposed methodology and the list of software used. As a result of the work, active losses on the planar winding were reduced by 7.3%, based on these theoretical data.

Key words: efficiency, planar winding, losses, power, power supply module, winding optimization, topology, winding turns, winding resistance.

References

1. <https://www.el-info.ru/koeffitsient-poleznogo-dejstviva-transformatora>.
2. Moiseenko A.A., Fyedorov S.M. “The method of finding losses in the throttle winding due to the skin effect and the proximity effect”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021. vol. 17, no. 6, pp. 87-94.
3. Veretennikov N.Yu., Moiseenko A.A. “Methodology for calculating and optimizing high-frequency losses in magnetic components”, *Proc. of the XXVII Int. Sci. and Tech. Conf. dedicated to the 60th anniversary of space flights by Yuri Gagarin and G.S. Titov: Radar, Navigation, Communication (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz’)*, Voronezh, 2021, pp. 185-193.
4. Knabben G.C., Zulauf G., Schäfer J., Kolar J.W., Kasper M.J., Anderson J.A., Deboy G. “Conceptualization and analysis of a next-generation ultra-compact 1.5-kW PCB-integrated wide-input-voltage-range 12V-output industrial DC/DC converter module”, *Electronics 10*, 2021, no. 17, pp. 2158.
5. Bul’ O.B. “Methods of calculation of magnetic systems of electric devices” (“Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov”), textbook, Moscow: Akademiya, 2005, 335 p.

Submitted 21.08.2022; revised 13.12.2022

Information about the authors

Oleg Yu. Denisov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)300-300-5-422 e-mail: denivuk.oleg@yandex.ru

Aleksey A. Moiseenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)300-300-5-326, e-mail: viktori_buh@mail.ru

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: Fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

ВЫДЕЛЕНИЕ РЕЧИ ПРИ ПОМОЩИ ЧАСТИЧНО АСИНХРОННОЙ МИКРОФОННОЙ РЕШЕТКИ БЕЗ ПОВТОРНОЙ ВЫБОРКИ

А.В. Башкиров, И.С. Бобылкин, А.А. Кузёмкин, В.Р. Тимошилова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: статья рассматривает проблему выделения источников речи, зафиксированных несколькими пространственно разделенными устройствами, каждое из которых имеет несколько микрофонов и обрабатывает сигналы с разной скоростью. Большинство методов асинхронной обработки массива основаны на определении смещения частоты дискретизации и повторной дискретизации. Но эти смещения бывает трудно оценить, если источники и микрофоны смещаются. Мы предлагаем метод разделения источников, который не требует оценки смещения или повторной выборки сигнала. Вместо этого мы распределяем распространяющийся массив на несколько синхронных подмассивов. Все массивы используются совместно для оценки статистики изменяющегося сигнала во времени. Эти статистические данные применяются для разработки отдельных, изменяющихся во времени пространственных фильтров в каждом массиве. Демонстрируется метод для сочетания речи, записанной как на стационарных, так и на движущихся микрофонных датчиках. Подробно рассмотрены эксперименты по разделению речи, в результате которых выяснилось, что предлагаемый метод асинхронного разделения эффективен в разложении источников. Применение данного метода предполагает и ситуации, когда источников больше, чем микрофонов. Также рассмотрен эксперимент с проведением совещания как сценария с движущимися носимыми массивами, в ходе которого проведен анализ эффективности разделения речи

Ключевые слова: асинхронная микрофонная решетка, специальная микрофонная решетка, распространяющиеся массивы, смещение частоты дискретизации, разделение источников звука, пространственная фильтрация, улучшение речи

1. Актуальность работы

Микрофонные решетки полезны для разделения и усиления аудиосигналов, поскольку они могут изолировать источники звука, поступающие с разных направлений. За последние несколько лет микрофоны стали использоваться повсюду в бытовой электронной аппаратуре. Они есть в мобильных телефонах, слуховых аппаратах, компьютерах, игровых системах и умных колонках. Если бы множество распределенных микрофонов были объединены в единую специальную матрицу, они обеспечили бы большее пространственное разрешение и, следовательно, лучшую производительность разделения, чем любое из устройств по отдельности.

В зависимости от назначения оборудования, на различных устройствах устанавливаются микрофоны с разной частотой. Хотя в большинстве случаев эти смещения незначительны, они могут иметь решающее значение при обработке массивов, которая зависит от точных фазовых соотношений между микрофонами. В имеющейся информации было предложено несколько методов асинхронной обработки массивов. В источниках системы сначала оцени-

вают смещения частоты дискретизации и повторно дискретизируют сигналы с общей частотой. Производится повторная выборка сигналов, которые затем могут быть когерентно объединены с использованием обычных методов обработки массива. К сожалению, известно, что существующие алгоритмы оценки частоты дискретизации плохо работают для движущихся источников и часто вообще не работают для движущихся микрофонов, что мы продемонстрируем в следующих разделах. Для разделения источников в самых сложных средах нам нужны новые асинхронные методы разделения источников, не требующие повторной выборки и хорошо масштабируемые для устройств с большим количеством микрофонов.

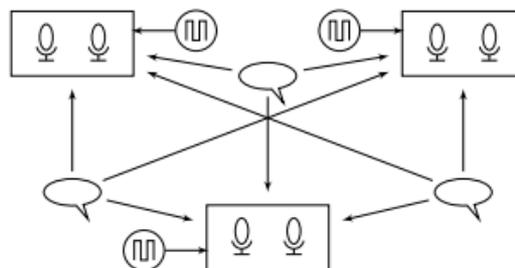


Рис. 1. Разделение источников с использованием микрофонных решеток, каждая из которых имеет свою собственную частоту дискретизации

которых некоторые микрофоны используют общую частоту дискретизации, а другие - нет, как показано на рис. 1.

Поскольку микрофоны стали меньше и дешевле, многие устройства теперь содержат в себя по крайней мере два. Мы можем воспользоваться преимуществами этой частичной синхронизации для выполнения разделения источников с несколькими микрофонами без повторной выборки. В предлагаемой нами системе каждое устройство применяет отдельный линейный пространственный фильтр, изменяющийся во времени, к сигналам, собранным его локальной микрофонной решеткой.

Коэффициенты фильтра вычисляются с помощью информации исходных данных из полного распределенного массива. Для речи и других разреженных сигналов эта общая информация может принимать форму вероятностей активности источника, вычисленных с использованием пространственных объектов из каждого массива. Мы демонстрируем предложенный алгоритм на реальных записях, используя до восьми источников речи с применением как стационарных, так и движущихся асинхронных микрофонных решеток.

2. Асинхронная обработка массива

Рассмотрим множество из M распространенных массивов и пусть $x_{c,m}(t)$ – вектор непрерывных сигналов, зафиксированных массивом m для $m = 1, \dots, M$. Массивы не обязательно должны иметь одинаковое количество микрофонов. Если бы массивы имели общий период дискретизации T , то дискретизированные временные последовательности были бы $\tilde{x}_{d,m}[\tau] = x_{c,m}(\tau T)$ для целых временных индексов τ . Вместо этого каждый массив имеет свой собственный период выборки T_m , так что выбранные векторы данных равны $x_{d,m}[\tau] = x_{c,m}(\tau T_m)$ для $m = 1, \dots, M$. Принимаемые сигналы соответствуют K независимым источникам звука так, что:

$$x_{d,m}[\tau] = \sum_{k=1}^K c_{d,m,k}[\tau] \text{ for } m = 1, \dots, M, \quad (1)$$

где $c_{d,m,k}[\tau]$ - отклик массива m на источник k , который часто называют исходным изображением.

Источники могут включать в себя как направленные источники звука, так и рассеян-

ный шум. Наша цель состоит в том, чтобы оценить одно или несколько исходных изображений $c_{d,m,k}[\tau]$ из множества $x_{d,1}[\tau], \dots, x_{d,M}[\tau]$.

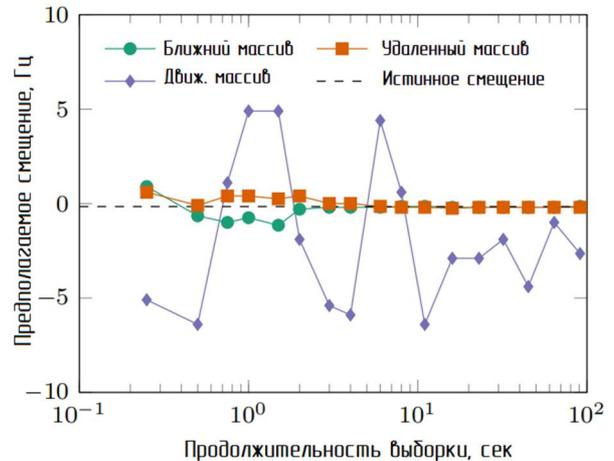


Рис. 2. Предполагаемые смещения частоты дискретизации между близко расположенными, удаленными и движущимися массивами в сценарии совещания с участием восьми говорящих (см. Раздел 3.2) с использованием портативных самописцев и двухэтапного алгоритма максимизации корреляции

2.1. Модель смещения частоты дискретизации

Пусть $c_{m,k}[n, f]$, $\tilde{x}_m[n, f]$, и $x_m[n, f]$ - векторы кратковременного преобразования Фурье (STFT) соответствующих дискретных последовательностей, где n - коэффициент кадра, а f - коэффициент частоты. Поскольку каждый массив имеет разную частоту дискретизации, коэффициенты $[n, f]$ каждой последовательности $x_m[n, f]$ соответствуют разным непрерывным временным интервалам и частотам. Мы предполагаем, что время выборки грубо синхронизировано, и что смещения частоты дискретизации достаточно малы, чтобы последовательности $x_{d,m}[\tau]$ смещены друг от друга намного меньше, чем на одну длину кадра STFT за интересующий период. Мы можем смоделировать эффект этих смещений как:

$$x_m[n, f] = e^{j\alpha_m[n, f]} \tilde{x}_m[n, f], \quad (2)$$

где $\alpha_m[n, f]$ - сдвиг фазы из-за небольшого смещения частоты дискретизации в массиве m . Затем, предполагая, что последовательности являются случайными процессами с нулевым средним значением, корреляции между массивами задаются как:

$$E [x_m[n, f] x_l^H[n, f]] =$$

$$= E \left[e^{j(\alpha_m[n,f] - \alpha_l[n,f])} \tilde{x}_m[n,f] \tilde{x}_l^H[n,f] \right], \quad (3)$$

где E обозначает ожидание, а H - эрмитову транспонировку. Если смещения частоты дискретизации достаточно малы и не зависят от времени в течение интересующего периода, то каждый $\alpha_m[n,f]$ приблизительно пропорционален $nf(T^{-1} - T_m^{-1})$.

Если $\tilde{x}_m[n,f]$ приблизительно стационарны в течение длительного интервала времени, то относительные смещения частоты дискретизации могут быть оценены на основе этих взаимных корреляций, и последовательности $x_{d,m}[\tau]$ могут быть повторно выбраны для получения оценок $\tilde{x}_{d,m}[\tau]$. Известно, что методы, основанные на корреляции, чувствительны к движению источника. Перемещение самих микрофонов является фатальным, поскольку смещение частоты дискретизации и движение с постоянной скоростью вызывают почти идентичные линейные фазовые сдвиги. На рис. 2 показана производительность алгоритма оценки частоты дискретизации вслепую в сценарии совещания. Он хорошо работает, когда микрофоны неподвижны, даже если они находятся далеко друг от друга, но является неудачным, когда один микрофон перемещается относительно другого. Таким образом, эти алгоритмы плохо подходят для сценариев совещания с микрофонами, которые переносят движущиеся люди.

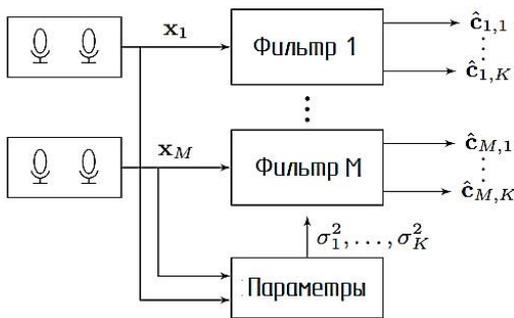


Рис. 3. Каждое устройство оценивает каждое исходное изображение, используя свои локальные микрофоны. Мощности источника оцениваются с использованием всех M массивов

Здесь мы рассматриваем наихудший сценарий, в котором мы мало знаем о смещениях фаз между массивами. В частности, мы моделируем каждую $\alpha_m[n,f]$ как независимую случайную величину, равномерно распределенную от $-\pi$ до π . В соответствии с этой моделью

$E[e^{j\alpha_m[n,f]}] = 0$, по линейности математического ожидания мы имеем:

$$E \left[x_m[n,f] x_l^H[n,f] \right] = 0 \text{ для } m \neq l. \quad (4)$$

Таким образом, охваченные последовательности не коррелируют с массивами. Предполагая, что исходные изображения некоррелированы друг с другом, их линейные оценки минимальной среднеквадратичной ошибки задаются многоканальными фильтрами Винера:

$$\hat{c}_{m,k}[n,f] = R_{m,k}[n,f] \left(\sum_{k=1}^K R_{m,k}[n,f] \right)^{-1} x_m[n,f], \quad (5)$$

для $m = 1, \dots, M$ и $k = 1, \dots, K$, где каждый $R_{m,k}[n,f] = E \left[c_{m,k}[n,f] c_{m,k}^H[n,f] \right]$ является изменяющейся во времени ковариационной матрицей исходного изображения. Поскольку изображения получены как от направленных, так и от рассеянных источников, мы предполагаем, что $\sum_{k=1}^K R_{m,k}[n,f]$ не является сингулярным для всех m, n и f . Таким образом, линейные оценки для исходных изображений в каждом массиве используют только локальные микрофоны в этом массиве. Если в каждой матрице всего несколько микрофонов, то эти фильтры могут работать довольно плохо по сравнению с фильтрами для синхронной распределенной матрицы.

2.2. Распределенная пространственная фильтрация

Многоканальный фильтр Винера (5) часто реализуется с использованием изменяющихся во времени оценок $\hat{R}_{m,k}[n,f]$ нестационарных ковариаций источника. Алгоритмы выделения основываются на хороших оценках ковариации, и именно здесь мы можем воспользоваться преимуществами асинхронных массивов. Хотя последовательности $x_m[n,f]$ и $x_l[n,f]$ некоррелированы при $m \neq l$ из-за их предполагаемых случайных фазовых сдвигов, они не являются независимыми: обе генерируются одним и тем же набором источников. Таким образом, мы можем использовать информацию из всех M массивов для оценки, изменяющейся во времени исходной статистики, а затем использовать эту статистику для создания M изменяющихся

во времени пространственных фильтров. Предлагаемая система показана на рис. 3.

Мы применим вариант полноранговой локальной гауссовой модели, в котором мы предполагаем, что каждое исходное изображение $c_{m,k}[n, f]$ имеет нулевое среднее значение и условное нормальное распределение с учетом его ковариации.

$$R_{m,k}[n, f] = \sigma_k^2[n, f] \bar{R}_{m,k}[f], \quad (6)$$

где $\sigma_k^2[n, f]$ - изменяющийся во времени спектр источника, а $\bar{R}_{m,k}[f]$ - частотно-зависимая пространственная ковариация, которая зависит от источника, геометрии решетки и акустики помещения. Для простоты мы принимаем, что каждая $\bar{R}_{m,k}[f]$ является неизменяющейся по времени, и что полноразрядная ковариационная матрица учитывает неопределенность, обусловленную движением массива. Что обычно и выполняется с локальной гауссовой моделью, мы предположим, что $c_{m,k}[n, f]$ условно независимы от n, f и k , учитывая спектры источника $\sigma_1^2[n, f], \dots, \sigma_K^2[n, f]$. Далее допустим условную независимость от m , что отражает некоррелированность сигналов массива из (4).

Предлагаемый метод оценки заключается в следующем:

1. Оценить пространственные параметры $\bar{R}_{m,k}[f]$, используя любой подходящий метод. Мы показываем экспериментальные результаты в разделе 3, используя как слепой метод, так и метод, основанный на обучении.

2. Найти $\hat{\sigma}_k^2[n, f]$ изменяющихся во времени спектров источника $\sigma_k^2[n, f]$ с использованием наблюдений из всех M массивов. Для редких сочетаний оценка предложена в разделе 2.3.

3. Использовать предполагаемые спектры источников и пространственные параметры в (5) для оценки исходных изображений в каждом массиве:

$$\begin{aligned} \hat{c}_{m,k}[n, f] &= \\ &= \sigma_k^2[n, f] \bar{R}_{m,k}[f] \cdot \\ &\cdot \left(\sum_{s=1}^K \hat{\sigma}_s^2[n, f] \bar{R}_{m,s}[f] \right)^{-1} x_m[n, f]. \end{aligned} \quad (7)$$

2.3. Общая спектральная оценка для разреженных источников

На данный момент существует множество методов оценки изменяющихся во времени спектров источников. Такие методы чаще всего основаны на максимизации математического ожидания и неотрицательной факторизации матрицы. Нам интересен источник речи, поэтому продемонстрируем метод классификации, который использует преимущества частотно-временной разреженности речи. Непересекающаяся ортогональная модель используется для одноканальных методов, например, для частотно-временных масок. Однако она также применяется для недетерминированного разделения нескольких микрофонов, что предполагает для каждого $[n, f]$ возможность назначить состояние $s[n, f] \in \{1, \dots, K\}$, такое, что $\sigma_{s[n,f]}^2[n, f] \gg \sigma_k^2[n, f]$ для $s[n, f] \neq k$. Чтобы учесть периоды без активных направленных источников, мы включаем в модель один источник рассеянного шума.

Пусть $\sigma_{k|s}^2[f]$ обозначает отклонение источника k при индексе частоты f , когда система находится в состоянии s . Мы моделируем дисперсию как принимающую одно из двух значений для каждого источника, в зависимости от состояния (8).

$$\sigma_{k|s}^2[f] = \begin{cases} \sigma_{k,\text{high}}^2[f], & \text{если } k = s; \\ \sigma_{k,\text{low}}^2[f], & \text{если } k \neq s. \end{cases} \quad (8)$$

Типичные системы на основе масок выбирают $\sigma_{k,\text{low}}^2 = 0$, но поскольку микрофонные массивы могут управлять несколькими нулями одновременно, выгодно включать все источники. В таком случае мы выбираем $\sigma_{k,\text{high}}^2[f]$ и $\sigma_{k,\text{low}}^2[f]$, соответственно, на 10 дБ выше и на 10 дБ ниже среднего спектра источника, который, как мы обнаружили, хорошо работает для источников речи. Источник рассеянного шума имеет один и тот же предполагаемый спектр в каждом состоянии, и его величину можно настроить для улучшения обработки матриц в формуле (7). В нашем случае мы используем в качестве эксперимента некоррелированный спектр, аналогичный по мощности спектру направленных источников речи.

В соответствии с локальной моделью Гаусса логарифмическая вероятность наблюдений в состоянии s определяется по формуле (9).

$$\log p_s[n, f] = - \sum_{m=1}^M \log \det \left(\pi \sum_{k=1}^K \sigma_{k|s}^2(f) \bar{R}_{m,s}[f] \right). \quad (9)$$

Тип микрофона		Повторная выборка		Неповторная выборка	
		K = 3	K = 4	K = 3	K = 4
	Необработанный	3.0	5.0	3.0	5.0
Статический	2	0.7	0.3	0.7	0.3
	8	8.2	2.9	2.1	0.1
Варьирующийся	2	1.3	0.5	1.3	0.5
	2 × 4	5.5	2.2	5.5	2.2

Рис. 4. Средняя производительность SDR, в дБ, для нескольких фильтров

Апостериорная вероятность состояния s задается как $\gamma_s[n, f] = \frac{p_s[n, f]}{\sum_{k=1}^K p_k[n, f]}$.

Байесовская оценка каждой последовательности мощности источника задается по формуле (10).

$$\sigma_k^2[n, f] = \sum_{s=1}^K \gamma_s[n, f] \cdot \sigma_{k|s}^2[f]. \quad (10)$$

3. Эксперименты по разделению речи

В данном разделе продемонстрирована эффективность предложенного метода в двух сценариях с использованием двух различных методов оценки параметров. Мы сообщаем о результатах, используя критерий отношения сигнала к искажению SDR (11).

$$SDR_{m,k} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{\tau} |c_{d,m,k}[\tau]|^2}{\sum_{\tau} |\hat{c}_{d,m,k}[\tau] - c_{d,m,k}[\tau]|^2}. \quad (11)$$

3.1. Кампания по оценке разделения сигналов (КОР). Асинхронное разделение источников (АРИ)

Чтобы понять производительность предлагаемого метода разделения источников без повторной выборки, мы сначала сравним его с методами, основанными на повторной выборке.

Поскольку источники и микрофоны в этом сценарии фиксированы, можно оценить смещения частоты дискретизации и скорректировать их перед применением обычных технологий синхронного слепого разделения источников. Наша базовая реализация повторной выборки сочетает в себе два подхода: сначала мы используем двухэтапную максимизацию корреля-

ции для оценки смещений частоты дискретизации, затем корректируем их с помощью интерполяции Лагранжа.

Источники разделяются вслепую с помощью автономного независимого векторного анализа, и мы выводим ковариационные матрицы источников первого ранга из результирующих фильтров размешивания. Мы используем эти ковариационные матрицы, рассчитанные вслепую для проектирования четырех разделительных фильтров, сравниваются в строках рис. 4. Каждый фильтр тестируется с повторной дискретизацией сигналов и без нее.

Когда сигналы повторно дискретизируются перед разделением, синхронный восьмиканальный фильтр превосходит все другие методы. Когда мы ограничиваем фильтры использованием двух микрофонов, проблема разделения недостаточно определена, поэтому изменяющиеся во времени фильтры работают лучше, чем статический фильтр.

Фактически, при использовании других регистраторов для классификации активного источника двухканальный фильтр работает почти так же хорошо, как и статический восьмиканальный фильтр. Далее мы тестируем четыре фильтра без повторной выборки сигналов. На двухканальные фильтры это не влияет, так как два микрофона каждого регистратора настраиваются синхронно.

Восьмиканальный фильтр работает намного хуже, поскольку он полагается на согласованность между массивами. Предлагаемая производительность асинхронного изменяющегося во времени фильтра идентична с повторной дискретизацией или без нее, что позволяет предположить, что он устойчив к смещениям частоты дискретизации.

3.2. Сценарий с движущимися носимыми массивами

Предлагаемый метод работает хуже, чем ранее предложенные методы для набора данных, которые поддаются повторной выборке, но он должен лучше подходить для движущихся массивов, для которых повторная выборка затруднена или невозможна.

Теперь мы рассмотрим эксперимент по улучшению прослушивания, в котором микрофонные решетки прикрепляются к движущимся слушателям-людям в сценарии совещания. В этом сценарии существует до восьми одновременных источников речи. Поскольку существующие методы разделения вслепую плохо

подходят для таких больших смесей и поскольку мы хотим продемонстрировать достижимые производительности асинхронной антенной системы, для этого эксперимента мы используем измеренные, а не оцененные пространственные параметры.

Записи были сделаны в Лаборатории дополненного прослушивания Иллинойского университета в Урбана-Шампейн, время реверберации которых составляет около $T = 300$ мс.

Сценарий состоит из восьми говорящих, которые были смоделированы с помощью громкоговорителей, воспроизводящих клипы из базы данных, и трех реальных слушателей-людей. Каждый слушатель-человек носил на голове набор из восьми всенаправленных петличных микрофонов: по одному в каждом ухе и шесть прикрепленных к жесткой широкополой шляпе диаметром 60 см.

Слушатели непрерывно двигали головами во время записи, попеременно кивая, оглядывая комнату и поворачиваясь из стороны в сторону. Двадцать четыре сигнала были записаны на одном интерфейсе, дискретизированы на частоте 16 кГц и отфильтрованы в диапазоне высоких частот от 100 Гц для удаления низкочастотных внешних шумов. Искусственные смещения частоты дискретизации $\pm 0,3$ Гц были применены к двум массивам с использованием интерполяции Лагранжа. STFT был вычислен с использованием окна фон Ханна длиной 4096 и 75% перекрытия. Матрицы пространственной ковариации $\bar{R}_{m,k}$ оценивались с использованием 5-секундных обучающих роликов от тех же говорящих и с аналогичными движениями слушателя, что и 15-секундные тестовые клипы. Поскольку фильтры предназначены для устройств бинаурального прослушивания, они дают оценку исходного изображения только для микрофонов в ушах, а не для микрофонов на шляпе. Чтобы измерить исходные изображения, исходные сигналы записывались по отдельности, а затем накладывались друг на друга для формирования микширования. С помощью этой процедуры мы имеем возможность измерить SDR истинности контакта «Ground», но это физически нереально, потому что движение человека отличается в каждой исходной записи.

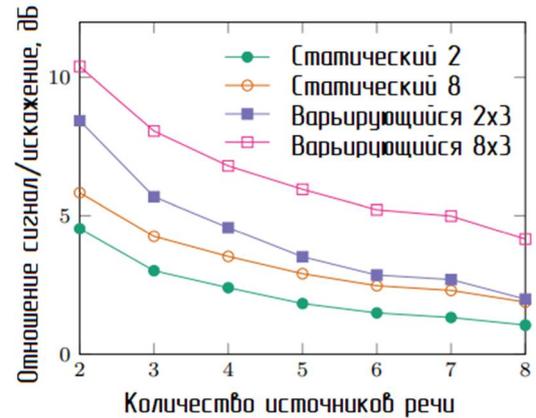


Рис. 5. Экспериментальные результаты для сценария совещания с подвижными носимыми микрофонными решетками. SDR усредняется по левому и правому ушам всех трех слушателей и по всем источникам

На рис. 5 сравниваются характеристики разделения четырех матриц: статическая матрица из двух микрофонов-вкладышей, статическая матрица из всех восьми микрофонов, изменяющаяся во времени асинхронная матрица из двух микрофонов на слушателя и изменяющаяся во времени асинхронная матрица из восьми микрофонов на слушателя. Примечательно, что распределенная матрица из двух микрофонов на слушателя превосходит статический массив с восемью микрофонами даже при наличии восьми источников. Распределенный классификатор помогает устранить неоднозначности между источниками, которые имеют аналогичные функции передачи для отдельных массивов. Это особенно важно для движущихся массивов: когда слушатель поворачивает голову из стороны в сторону, классификатор может использовать два других массива, чтобы решить, какой источник он слышит. Эта особенность не требует явного моделирования движения головы; это следствие модели пространственной ковариации полного ранга и условной независимости между подмассивами.

Заключение

Экспериментальные результаты из раздела 3 показывают, что предлагаемый метод асинхронного разделения может эффективно разделять речевые смеси, даже когда на каждом устройстве больше источников, чем микрофонов. Результаты КОР показывают, что он работает не так хорошо, как синхронизированный стационарный массив, но он превосходит одно устройство и не требует оценки смещения частоты дискретизации или повторной выборки.

Результаты сценария совещания показывают, что изменяющиеся во времени фильтры и классификатор состояний работают с движущимися микрофонами и хорошо масштабируются для больших массивов.

Распределенный классификатор – это особенно полезно для устранения неоднозначностей, когда массивы перемещаются или когда источники находятся далеко. Изменяющиеся во времени фильтры и классификатор полагаются на точную оценку пространственных ковариаций источника. В этой статье не предложен метод оценки этих параметров ни без слепого разделения источников на основе повторной выборки, ни без обучающих данных, и явно не моделируется их изменение с течением времени; асинхронная оценка параметров и отслеживание остаются важными задачами для будущей работы. Предлагаемая система асинхронного разделения источников хорошо подходит для распределенных массивов, в которых отдельные устройства имеют несколько микрофонов, расположенных далеко друг от друга.

Литература

1. Применение сигнала линейной частотной модуляции / Д.Р. Елкин, А.А. Затонский, И.С. Бобылкин и др. // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2021. Т. 1. С. 220-222.
2. Звуковой микшерский пульт для домашней студии звукозаписи / И.С. Бобылкин, С.П. Юров, А.Г. Безладный, Л.Н. Никитин // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: сб. науч.

тр. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2019. С. 14-17.

3. Каграманов Э.Э., Бобылкин И.С., Никитин Л.Н. Мобильная логопериодическая антенна // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: сб. науч. тр. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2019. С. 67-70.

4. Помехоустойчивое кодирование в современных форматах связи / А.В. Башкиров, Л.Н. Никитин, И.С. Бобылкин, А.С. Костюков, О.Ю. Макаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 2. С. 132-138

5. Пилотная оценка канала радиосвязи в MIMO-OFDM системах / О.Н. Чирков, М.А. Ромашенко, И.С. Бобылкин, Р.Н. Щипелев, А.А. Матвеев // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2019. Т. 2. С. 87-90.

6. Разработка и анализ модели, имитирующей помехи приема фазоманипулированных сигналов для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств / А.Л. Неклюдов, А.А. Пирогов, Н.В. Ципина, И.С. Бобылкин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 113-116.

7. Бобылкин И.С. Структура, основные задачи и математическое обеспечение процесса оптимального теплового проектирования радиоэлектронных средств // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6.2. С. 81-84.

8. Бобылкин И.С., Макаров О.Ю., Шуваев В.А. Основные методики решения задач оптимального теплового проектирования конструкций радиоэлектронных средств // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 2. С. 47-52.

9. Башкиров А.В., Ситников А.В., Хорошайлова М.В. Оптимизация аппаратной архитектуры LDPC-декодера, применяемого в стандарте радиосвязи IEEE 802.11N // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 97-99.

Поступила 05.11.2022; принята к публикации 13.12.2022

Информация об авторах

- Башкиров Алексей Викторович** – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fab7@mail.ru
- Бобылкин Игорь Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bobylnin@bk.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>
- Кузёмкин Андрей Александрович** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: andreyhillsa@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-8862>
- Тимошилова Виктория Романовна** – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: timoshilova.vika@yandex.ru

SPEECH EXTRACTION USING A PARTIALLY ASYNCHRONOUS MICROPHONE ARRAY WITHOUT REPEATED SAMPLING

A.V. Bashkirov, I.S. Bobylkin, A.A. Kuzyemkin, V.R. Timoshilova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article examines the problem of identifying speech sources recorded by several spatially separated devices, each of which has several microphones and processes signals at different speeds. Most methods of asynchronous array processing are based on determining the sampling frequency offset and resampling. But these offsets can be difficult to estimate if

the sources and microphones are shifting. We propose a source separation method that does not require bias estimation or signal resampling. Instead, we distribute the propagating array into several synchronous subarrays. All arrays are used together to evaluate the statistics of a changing signal over time. These statistics are used to develop separate, time-varying spatial filters in each array. We demonstrate a method for combining speech recorded on both stationary and moving microphone sensors. The article describes in detail experiments on speech separation, as a result of which it turned out that the proposed method of asynchronous separation is effective in decomposing sources. The use of this method also involves situations where there are more sources than microphones. The article also discusses an experiment with holding a meeting as a scenario with moving wearable arrays, during which an analysis of the effectiveness of speech separation was carried out.

Key words: asynchronous microphone array, special microphone array, propagating arrays, sampling frequency offset, sound source separation, spatial filtering, speech enhancement

References

1. Elkin D.R., Zatonkiy A.A., Bobylkin I.S. et al. "Application of a linear frequency modulation signal", *Proc. of the Int. Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo)*, Penza State University, 2021, vol. 1, pp. 220-222.
2. Bobylkin I.S., Yurov S.P., Bezladnyy A.G., Nikitin L.N. "Sound mixing console for home recording studio", *Collection of Scientific Papers: Problems of Ensuring Reliability and Quality of Devices and Systems (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem)*, Voronezh State Technical University, 2019, pp. 14-17.
3. Kagramanov E.E., Bobylkin I.S., Nikitin L.N. "Mobile logoperiodic antenna", *Collection of Scientific Papers: Problems of Ensuring Reliability and Quality of Devices and Systems (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem)*, Voronezh State Technical University, 2019, pp. 67-70.
4. Bashkirov A.V., Nikitin L.N., Bobylkin I.S., Kostyukov A.S., Makarov O.Yu. "Noise-resistant coding in modern communication formats", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 132-138.
5. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S., Shchipelev R.N., Matveev A.A. "Pilot evaluation of the radio communication channel in MIMO-OFDM systems", *Proc. of the Int. Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo)*, Penza State University, 2019, vol. 2, pp. 87-90.
6. Neklyudov A.L., Pirogov A.A., Tsipina N.V., Bobylkin I.S. "Development and analysis of a model simulating interference of receiving phase-manipulated signals to ensure electromagnetic compatibility of radio-electronic devices", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 113-116.
7. Bobylkin I.S. "Structure, main tasks and mathematical support of the process of optimal thermal design of radioelectronic means", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 6-2, pp. 81-84.
8. Bobylkin I.S., Makarov O.Yu., Shuvaev V.A. "Basic methods for solving problems of optimal thermal design of radioelectronic means structures", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 47-52.
9. Bashkirov A.V., Sitnikov A.V., Khoroshaylova M.V. "Optimization of the hardware architecture of the LDPC decoder used in the IEEE 802.11N radio communication standard *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6, pp. 97-99.

Submitted 05.11.2022; revised 13.12.2022

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fab7@mail.ru

Igor' S. Bobylkin, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bobylkin@bk.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-2249>

Andrey A. Kuzyemkin, MA, Voronezh State Technical University (Dr. Sci. (Technical)), e-mail: andreyhillsa@gmail.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2013-8862>

Viktoriya R. Timoshilova, MA, Voronezh State Technical University (Dr. Sci. (Technical)), e-mail: timoshilova.vika@yandex.ru

АНТЕННА С РЕКОНФИГУРИРУЕМЫМ УГОЛКОВЫМ ПЛАЗМЕННЫМ РЕФЛЕКТОРОМ

И.А. Баранников¹, Е.А. Ищенко¹, С.М. Фёдоров^{1,2}, Б.А. Шиянов²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается антенна с реконфигурируемым рефлектором. Ее рабочие частоты расположены в диапазоне UHF от 637 до 648 МГц. В качестве излучателя используется плазменная вибраторная антенна. Рефлектор является уголковым с углом между стенками 60°. Стенки рефлектора выполнены из плазменных элементов, представляющих собой газоразрядные трубки, способные включаться и выключаться за очень малые промежутки времени. Во включенном состоянии они являются проводящей поверхностью и отражают электромагнитные волны, а в выключенном - свободно их пропускают. Это позволяет за счет включения и выключения определенных групп плазменных элементов менять положение рефлектора в пространстве. Конструкция рефлектора и ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости позволяет обеспечить равномерное излучение во всех направлениях по горизонту. Так как в качестве излучателя используется плазменная антенна, возможно применение скрытного режима с пониженной эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР). Характеристики антенны определялись посредством электродинамического моделирования. Эффективность скрытного режима оценивалась сравнением ЭПР плазменной антенны и ее металлического аналога. Результаты показывают, что антенна обладает высокой эффективностью излучения и значительно меньшими значениями ЭПР в скрытном режиме

Ключевые слова: плазменная антенна, реконфигурируемый рефлектор

Введение

Плазменные элементы имеют два состояния: включенное и выключенное. В выключенном состоянии плазма не сформирована, и электромагнитные волны свободно проходят через емкость с газом. При включении формируется плазма, которая является проводящей поверхностью. Тогда электромагнитные волны будут поглощаться или отражаться, в зависимости от плазменной частоты [1]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi n e^2}{m_e}}, \quad (1)$$

где n – концентрация свободных электронов или мера ионизации плазмы,
 e – заряд электрона,
 m_e – масса электрона.

Воспользовавшись способностью плазменных элементов включаться и выключаться, возможно создать реконфигурируемый рефлектор, отражающая поверхность которого может менять свое положение в пространстве посредством включения и выключения групп плазменных элементов.

В работе [2] авторы описывают исследование конструкции антенны с реконфигурируемым плазменным уголковым рефлектором. Они провели сравнение результатов электродинамического моделирования антенны с реальными измеренными характеристиками. Полученные результаты показывают, что результаты моделирования очень близки к реальным характеристикам антенны.

В работе [3] авторы провели исследование реконфигурируемого плазменного рефлектора в виде круга и производят сравнение его характеристик с аналогичными конструкциями из металла. Результаты данного исследования показывают, что характеристики конструкции на основе плазмы незначительно отличаются от характеристик конструкции из металла.

В исследовании [4] авторы изучали свойства плазмы и ее применение в качестве материала рефлектора. Они приводят математическое описание плазмы и описывают конструкцию плазменного элемента, использованного для построения рефлектора. Результаты моделирования характеристик антенны говорят о достаточной эффективности плазменного рефлектора.

В работе [5] авторы изучали возможность создания сканирующей антенны с плазменным рефлектором. Результаты исследования показали, что представленная конструкция рефлекто-

ра способна обеспечить несколько режимов с разной шириной сканирующего луча.

В работе [6] приводятся теоретические основы работы плазмы и рассматриваются различные конструкции плазменных антенн.

В данной статье производится моделирование антенны с реконфигурируемым плазменным рефлектором, а также различных его режимов. Определение эффективности снижения радиолокационной заметности проводилось посредством сравнения значений ЭПР конструкции в выключенном состоянии со значениями металлического аналога.

Конструкция антенны

Рефлектор состоит из цилиндрических плазменных элементов (газоразрядных трубок) диаметром 14 мм и высотой 433 мм. Они образуют собой массив плазменных элементов в виде двенадцатиконечной звезды. Шаг между элементами составляет 9.47 мм. В активном состоянии длина стенки рефлектора составляет 718.08 мм, а угол между стенками 60°. В качестве излучателя используется плазменная антенна. Она расположена в центре на высоте 140 мм. Плазменная частота элементов рефлектора для исследуемой модели (рис. 1) составляет 3.5 ГГц.

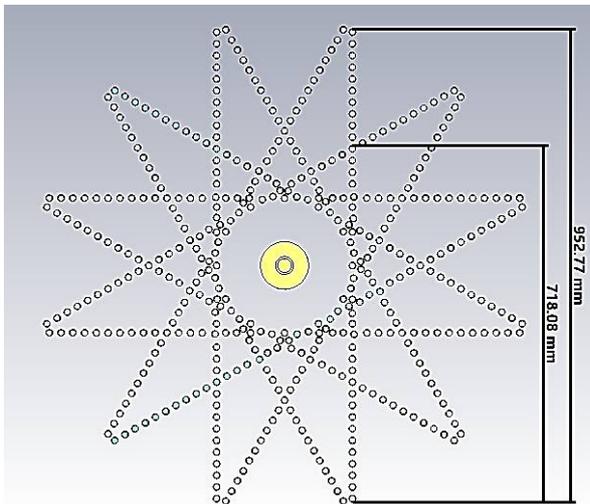


Рис. 1. Модель исследуемого рефлектора – вид сверху

Изменение положения рефлектора в пространстве осуществляется посредством включения и выключения определенных групп газоразрядных трубок. Целевым диапазоном работы данной конструкции является 640 МГц. Для проверки характеристик антенны производилось электродинамическое моделирование.

Моделирование характеристик рефлектора

Полоса рабочих частот определялась по уровню КПД 80% (рис. 2).

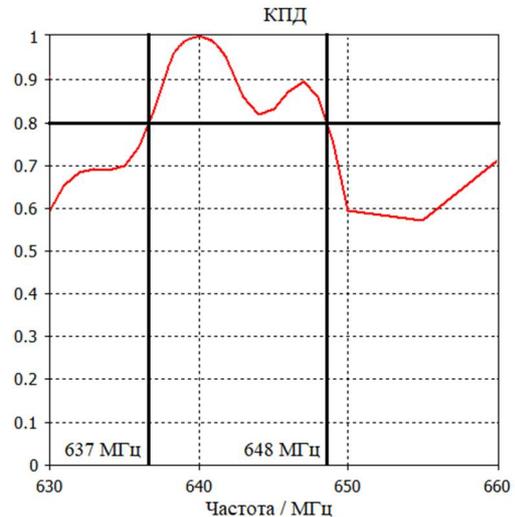


Рис. 2. График КПД антенны

Из графика видно, что диапазон рабочих частот располагается от 637 до 648 МГц. Ширина рабочего диапазона 11 МГц. Диаграммы направленности приведены для частоты максимума КПД 640 МГц (рис. 3).

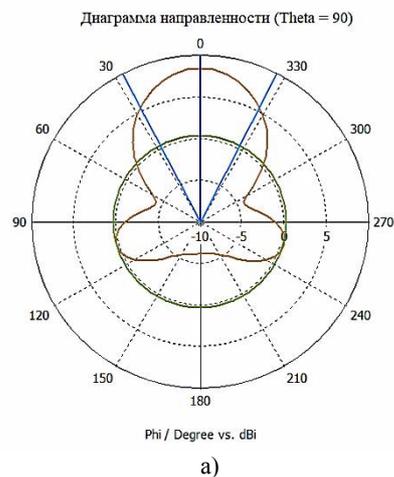


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны: а) в горизонтальной плоскости; б) в вертикальной плоскости

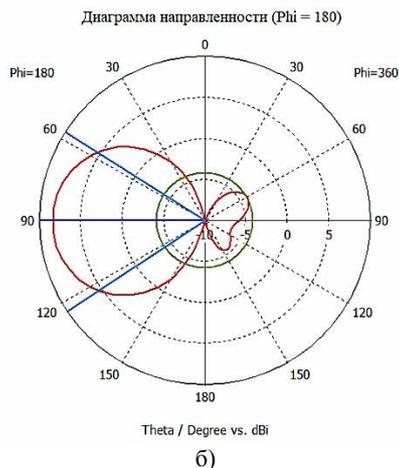


Рис. 3. Диаграмма направленности антенны: а) в горизонтальной плоскости; б) в вертикальной плоскости (продолжение)

КНД антенны составляет 8.43 дБи, ширина главного лепестка по уровню 3 дБ равна 54.4° в горизонтальной плоскости. Переключение стенок рефлектора позволяет вращать диаграмму направленности с шагом 30° (рис. 4).

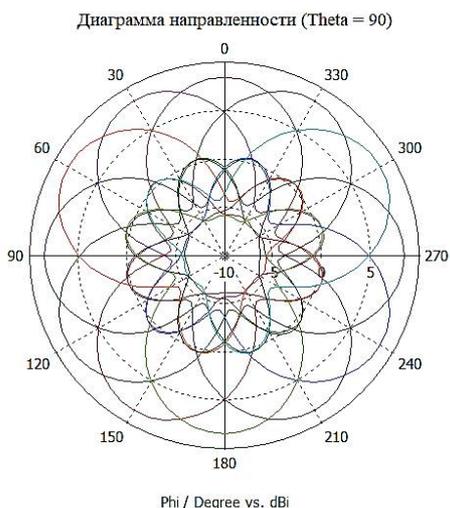
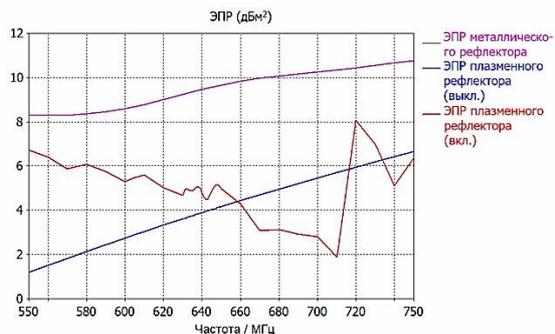


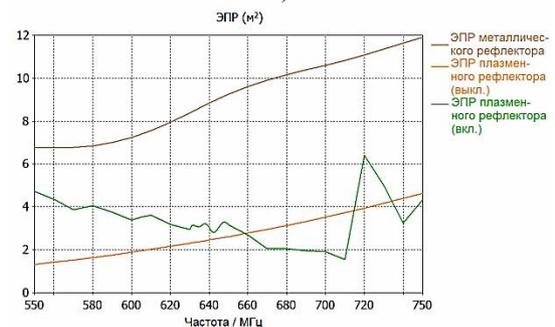
Рис. 4. Диаграммы направленности для всех возможных направлений излучения

Как видно из рис. 4, при вращении диаграмма направленности не претерпевает никаких изменений. Антенна может обеспечить равное излучение во всех направлениях в горизонтальной плоскости.

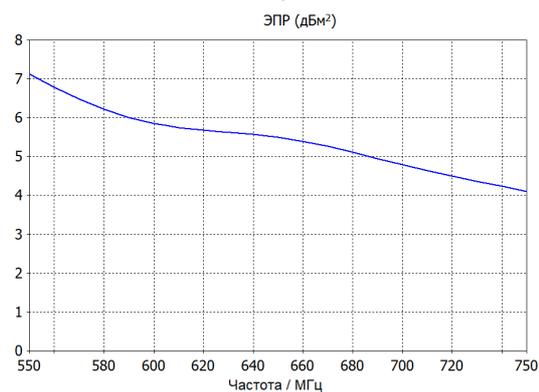
Определение значений ЭПР осуществлялось посредством моделирования облучения раскрытого рефлектора плоской электромагнитной волной. Результаты зависимости ЭПР от частоты представлены на рис. 5.



а)



б)



в)

Рис. 5. Сравнение ЭПР плазменного и металлического рефлекторов: а) ЭПР в дБм²; б) ЭПР в м²; в) разность ЭПР металлического рефлектора и плазменного рефлектора в скрытом режиме в дБм²

Из результатов видно, что плазменный рефлектор имеет значительно меньшие значения ЭПР, чем металлический.

Для удобства сравнения характеристик плазменного и металлического рефлектора представим их в таблице.

Сравнение характеристик плазменного рефлектора и его металлического аналога

Характеристика	Плазменный рефлектор	Металлический рефлектор
КНД max (f = 640 МГц), дБ	8.43	11.08
КПД (f = 640 МГц), %	98%	96%
ЭПР (f = 640 МГц), м ²	2.45 (выкл.)	8.83
ЭПР (f = 640 МГц), дБм ²	3.89 (выкл.)	9.46

Заключение

Использование плазмы в качестве материала рефлектора позволяет осуществлять изменение направления излучения немеханическим путем. Плазменный рефлектор близок по своим параметрам к аналогичному металлическому, помимо этого обладает возможностью во время радиомолчания переходить в скрытный режим, что значительно снижает его значения ЭПР и, следовательно, радиолокационную заметность. Полученные результаты исследования показывают, что плазма является одним из перспективных материалов для устройств UHF диапазона.

Литература

1. Anderson T. Plasma Antennas. Artech House: USA, 2011. 203 p.

2. Performance and Radiation Patterns of a Reconfigurable Plasma Corner-Reflector Antenna/ M.T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel and M. Himdi// in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2013. Vol. 12. pp. 1137-1140. DOI: 10.1109/LAWP.2013.2281221.

3. Reconfigurable antenna using plasma reflector/ Mohd Taufik Jusoha, Khairol Amali Ahmadb, Muhammad Faiz Md Dinc, and Fakroul Ridzuan Hashimd// AIP Conference Proceedings 1930, 020029 (2018). DOI: 10.1063/1.5022923

4. Russo P. and Cerri G. Analysis of a reconfigurable plasma antenna// 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2016. pp. 1-5. DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7481509.

5. Scanning capability of reconfigurable plasma reflector antenna/ M.T. Jusoh, O. Lafond, F. Colombel and M. Himdi// 2013 European Microwave Conference. 2013. pp. 80-83. DOI: 10.23919/EuMC.2013.6686595.

6. Mohd Taufik Jusoh Tajudin. Study and design of reconfigurable antennas using plasma medium// Electronics. Université Rennes 1. 2014. NNT: 2014REN1S019.

Поступила 28.10.2022; принята к публикации 13.12.2022

Информация об авторах

Баранников Илья Андреевич – инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

Ищенко Евгений Алексеевич – инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Шиянов Борис Анатольевич – канд. техн. наук, профессор, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

ANTENNA WITH RECONFIGURABLE PLASMA CORNER REFLECTOR

I.A. Barannikov¹, E.A. Ishchenko¹, S.M. Fyedorov^{1,2}, B.A. Shiyanov²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the article deals with the antenna with reconfigurable reflector. Its operating frequencies are in the UHF band and are located at frequencies from 637 to 648 MHz. A plasma vibrator antenna is used as the transmitter. The reflector is a corner-shape with an angle between the walls of 60°. The walls of the reflector are made of plasma elements, which are gas-discharge tubes capable of switching on and off at very short intervals. When on, they are a conductive surface and reflect electromagnetic waves, and when off, waves pass them freely. This allows, by turning certain groups of plasma elements on and off, to change the position of the reflector in space. The design of the reflector and the width of the radiation pattern in the horizontal plane allows for uniform radiation in all directions across the horizon. Also, since a plasma antenna is used as a transmitter, a covert mode with a reduced radar cross-section (RCS) is possible. The characteristics of the antenna were determined by electrodynamic simulation. The efficiency of the covert mode was evaluated by comparing the RCS of the plasma antenna and its metal counterpart. The results show that the antenna has a high radiation efficiency and significantly lower RCS values in the stealth mode.

Key words: plasma antenna, reconfigurable reflector.

References

1. Anderson T. "Plasma antennas", USA: Artech House, 2011, 203 p.
2. Jusoh M.T., Lafond O., Colombel F., Himdi M. "Performance and radiation patterns of a reconfigurable plasma corner-reflector antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, vol. 12, pp. 1137-1140, doi: 10.1109/LAWP.2013.2281221.
3. Mohd Taufik Jusoha, Khairol Amali Ahmadb, Muhammad Faiz Md Dinc, Fakroul Ridzuan Hashimd "Reconfigurable antenna using plasma reflector", *AIP Conference Proc. 1930*, 2018, 020029, doi: 10.1063/1.5022923
4. Russo P., Cerri G. "Analysis of a reconfigurable plasma antenna", *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/EuCAP.2016.7481509.
5. Jusoh M.T., Lafond O., Colombel F., Himdi M. "Scanning capability of reconfigurable plasma reflector antenna", *2013 European Microwave Conf.*, 2013, pp. 80-83, doi: 10.23919/EuMC.2013.6686595.
6. Mohd Taufik Jusoh Tajudin "Study and design of reconfigurable antennas using plasma medium", *Electronics*, Université Rennes 1, 2014. NNT: 2014REN1S019.

Submitted 28.10.2022; revised 13.12.2022

Information about the authors

Il'ya A. Barannikov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

Evgeniy A. Ishchenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Boris A. Shiyarov, Cand. Sc. (Technical), Professor, International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ (5G/LTE)

Т. Ле Ань, Т.Л. Во Минь, Б. Данешманд

Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики
и оптики (Университет ИТМО), г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: сейчас и в будущем мобильные сети 5G, мобильные коммуникации и беспроводные сети должны соответствовать стандартам низкой задержки, высокой надежности, повышенной емкости, большей безопасности и быстрого подключения пользователей. Мобильные операторы постоянно ищут решения, которые позволят нескольким независимым абонентам работать в одной сети 5G. Одним из таких решений является использование технологии фрагментации сети (Network Slicing – NS) для распределения конечных сетевых ресурсов на одной и той же физической инфраструктуре. Принятие решений на основе данных имеет решающее значение для будущих сетей связи в связи с бурным ростом трафика. Для эффективного управления распределением сетевых ресурсов и доступностью сети использованы машинное и глубокое обучение в сети. Используются ключевые показатели эффективности (Key Performance Indicators – KPIs) для анализа входящего трафика и прогнозирования фрагментов сетевых ресурсов для распределения неизвестных устройств. Интеллектуальное распределение ресурсов позволяет эффективно использовать имеющиеся ресурсы на существующих фрагментах сети и обеспечивать высокую балансировку нагрузки. Используемая модель принимает интеллектуальное решение и выбирает наиболее подходящий фрагмент сети

Ключевые слова: фрагментации сети (Network Slicing – NS), ключевые показатели эффективности (Key Performance Indicators – KPIs), глубокое обучение, нормализация, программно-определяемые сети (Software-Defined Networking – SDN)

Введение

Сегодня беспроводная мобильная связь стала важной частью повседневной жизни. Экспоненциальный рост числа мобильных устройств, катализатором которого выступают новые услуги и приложения, требует тесной интеграции множества технологий. Требования к пропускной способности и пропускной способности сети также растут с каждым днем. Однако для гетерогенных беспроводных сетей бесперебойная работа и управление являются важнейшей частью и многие поставщики услуг изо всех сил стараются оправдать ожидания потребителей.

Сеть 5G является расширением сети LTE, которая меняет мобильную индустрию, позволяя предоставлять новые услуги, коммерческие возможности. 5G - мультисервисная сеть с множеством видов деятельности для создания богатого мобильного опыта в области развлечений, иммерсивного опыта, высокоскоростной мобильной связи и дополненной реальности.

Для уменьшения средней сетевой задержки многопутевая маршрутизация может использоваться в сочетании с транспортным шифрованием. Транспортный протокол реального

времени (Real-time Transport Protocol – RTP) может быть использован в сочетании с протоколом резервирования ресурсов (Resource Reservation Protocol – RSVP) для уменьшения задержки передачи при многопутевой маршрутизации без необходимости подтверждения доставки и повторной передачи. Протокол резервирования ресурсов (Resource Reservation Protocol – RSVP) позволяет резервировать сетевые ресурсы для обеспечения требуемого качества передачи данных в реальном времени через транспортный протокол реального времени (Real-time Transport Protocol – RTP) [1, 2]. С помощью многопутевой маршрутизации можно еще больше повысить вероятность своевременной доставки пакетов и обеспечить непрерывность вычислений в реальном времени при наличии резервных каналов связи [3-6].

Целью исследования является проведение фрагментации сети для оптимизации выбора подходящего сетевого фрагмента для устройства или услуги.

Задачей исследования является использование машинного обучения (Machine learning – ML) и глубокого обучения (deep learning – DL) для выбора и оптимизации распределения фрагментов сети для устройства или услуги. Также необходимо проанализировать общий трафик сети и спрогнозировать будущий тра-

фик сети, позволяя фрагментировать сети для наиболее подходящего устройства [7].

Глубокое обучение – это тип машинного обучения, в котором используется ряд алгоритмов для создания высоко абстрактных моделей данных путем объединения многочисленных слоев обработки со сложными структурами или включения множества нелинейных преобразований (рис. 1).

Исследования в этой области направлены на улучшение представлений и разработку алгоритмов для их изучения на основе огромного количества немаркированных данных. Некоторые представления основаны на интерпретации моделей обработки и передачи информации в неврологической системе, таких как нейронное

кодирование, чтобы попытаться понять связи между отдельными входами и соответствующими нейронными реакциями в мозге, и вдохновлены прорывами в нейронауке. Компьютерное зрение, автоматическое распознавание голоса, обработка естественного языка, распознавание звуков речи и биоинформатика - все они извлекли пользу из архитектур глубокого обучения, таких как сверточной нейронной сети (convolution neural network – CNN) и долговременной краткосрочной памяти (long short term memory – LSTM) и так далее. Было установлено, что они дают отличные результаты при решении нескольких исследовательских задач.

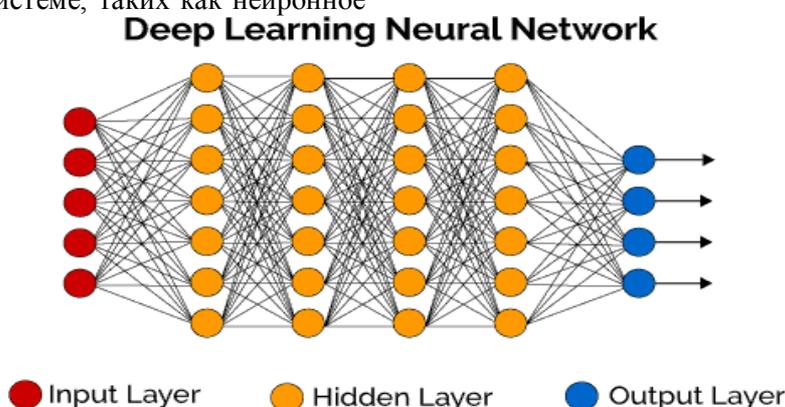


Рис. 1. Модель глубокого обучения [8]

Известно множество работ, посвященных исследованиям мобильных сетей, в том числе исследование Ericsson, в котором спрогнозирован будущий рост мобильных устройств, подключение к сети 5G и общий спрос на данные [9]. Авторы работы [10] рассматривают динамические ресурсы в многоуровневой многодоменной сети, работающей с различными сетевыми компонентами. Проблема присвоения формулируется как многодоменная задача смещения с максимальной оптимизацией полезности, предлагается многоуровневая многодоменная игра по подбору пользователей на фрагментации и многодоменная многопользовательская игра с обратным ходом.

В [11] предлагается архитектура ядра сети 5G, основанная на программно-определяемой сети (Software-Defined Networking – SDN), которая призвана обеспечить гибкость и простоту управления сетью.

Кроме того, использование SDN позволяет сделать сетевого провайдера независимым от провайдера. В статье предложен сетевой симулятор, построенный для оценки производительности архитектуры с точки зрения сквозной за-

держки, пропускной способности и использования ресурсов контроллера при различных сетевых факторах. В работе [12] авторы предлагают гибридную модель глубокого обучения, состоящую из сверточной нейронной сети (convolution neural network – CNN) и долговременной краткосрочной памяти (long short term memory – LSTM), для распределения ресурсов, реконфигурации сети, выбора фрагментов и балансировки нагрузки.

В данной работе представлен новый подход, основанный на виртуализации сетевых функций (Network Function Virtualization – NFV) и программно-определяемой сети SDN (Software-Defined Networking – SDN), управляемых стратегиями постановки в очередь. В статье предлагается комплексное решение для оценки с использованием реального трафика в физической тестовой среде. Оно использовано для проверки производительности и демонстрации таких функций, как динамическое распределение скорости передачи данных [13]. Авторы работы [14] исследовали систему приоритизации сетевого трафика для умных городов с использованием техники управления приоритетами SDN. В [15]

предлагается коммуникационное решение на основе сетевого фрагмента для автомобильных сетей. В работе сформулирован алгоритм кластеризации и фрагментации сети для разделения транспортных средств на различные кластеры и распределения фрагмента в каждом кластере.

Фрагментация обслуживает свои кластерные автомобили с помощью высококачественных каналов связи между автомобилями (vehicle to vehicle – V2V) и передает информацию о безопасности с низкой задержкой. В статье [16] авторы решают проблему фрагментации сети радиодоступа (Radio Access Network – RAN) для связи 5G между автомобилями и представляют метод мягкой фрагментации для безмодельного оппортунистического управления фрагментов. Результаты показывают, что предложенная схема улучшает эффективность выборки и превосходит традиционный метод и метод обучения с подкреплением. Идентификатор класса качества обслуживания и стандарты безопасности, связанные с обслуживанием, требуемые в [17], используются для идентификации и определения виртуализированной сети или участков виртуализированной сети. Taewhan начал работу над фрагментацией и рассмотрел вопросы стандартизации фрагментации, выбора фрагментов, определения независимых от фрагментации функций и, наконец, предложил архитектуру фрагментации плюс управление радиоресурсами [18].

Авторы [19] сформулировали оптимизационную модель смешанного целочисленного линейного программирования, которая обеспечивает оптимальное по стоимости развертывание сетевых фрагментов, позволяя оператору мобильной сети эффективно распределять ресурсы нижележащего уровня в соответствии с требованиями пользователей. Предлагаемое решение обеспечивает требуемую задержку и

пропускную способность, а также эффективно управляет работой нижележащих узлов, что приводит к снижению затрат. В [20] предлагается метод многоканальной передачи данных на основе вероятности затухания, который наилучшим образом отражает пользовательский опыт, поскольку время затухания больше всего влияет на качество и успешность исходного кода, а канал основан на минимальных значениях.

Когда несколько запросов на обслуживание отправляются несколькими устройствами, особенно одним и тем же устройством, возникает вопрос, какие устройства и соединения должны быть назначены каждому конкретному фрагменту сети. Решение этой проблемы заключается в использовании глубокого обучения для принятия быстрых, гибких, точных и обоснованных решений, а также распределения нагрузки на фрагменты сети с помощью нейронных сетей машинного обучения и глубокого обучения.

1. Анализ и обработка данных

1.1. Анализ данных

Есть в общей сложности 63168 входных данных. Каждые данные соответствуют 1 устройству, включая 7 входов и 1 выход [21].

Анализируем каждый столбец данных, смотрим максимальное/минимальное значение, начиная с которого можно обрабатывать данные.

Тип варианта использования (вход 1)

Данные распределены между 1 и 8, что соответствует следующим фактическим значениям: (1): Смартфон; (2): IoT-устройства; (3): Умный транспорт; (4): Индустрия 4.0; (5): AR / VR / Игра; (6): Здравоохранение; (7): Общественная безопасность; (8): Умный город / дом (рис. 2).

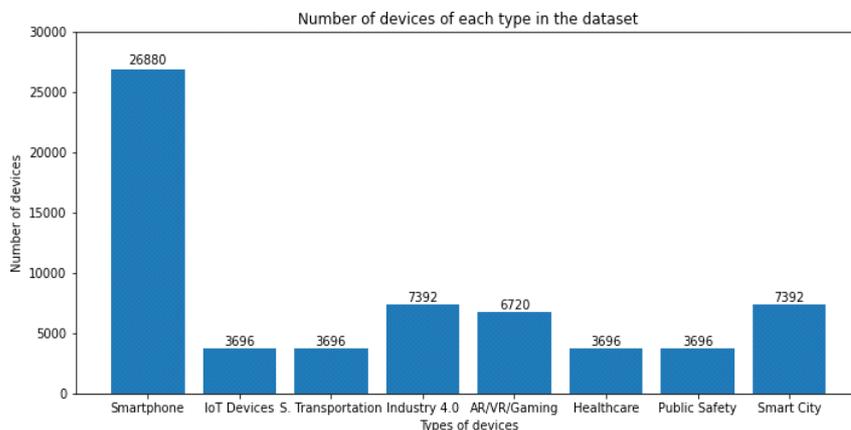


Рис. 2. Количество устройств каждого типа в наборе данных

Больше всего источников данных из-за их популярности и распространенности, и на них приходится 42,55%, причина в том, что сейчас почти 6,4 миллиарда человек владеют смартфонами, в результате чего наибольшая доля вводимых данных приходится на смартфоны [22]; на здравоохранение, Интернет вещей (IoT-устройства), умный транспорт приходится самый низкий показатель – 5,85%, потому что они еще не популярны в повседневной жизни; на Индустрию 4.0 и Умный город / Дом приходится 11,70%; на Виртуальную реальность / Игры приходится 10,63%.

Поддерживаемые технологии (вход 2)

Данные состоят только из 1 и 2, что соответствует фактическому значению: (1): LTE/5G.

Фундаментальное различие между LTE и 5G заключается в использовании спектра. Регулирующие органы стремятся повторно использовать спектр от других видов использования для увеличения пропускной способности мобильных сетей; (2): IoT (LTE-M, NB-IoT) – LTE-M и NB-IoT – это урезанные версии обычного LTE, целью которых является низкая стоимость, улучшенное покрытие (в помещениях) и лучшее время автономной работы (рис. 3).

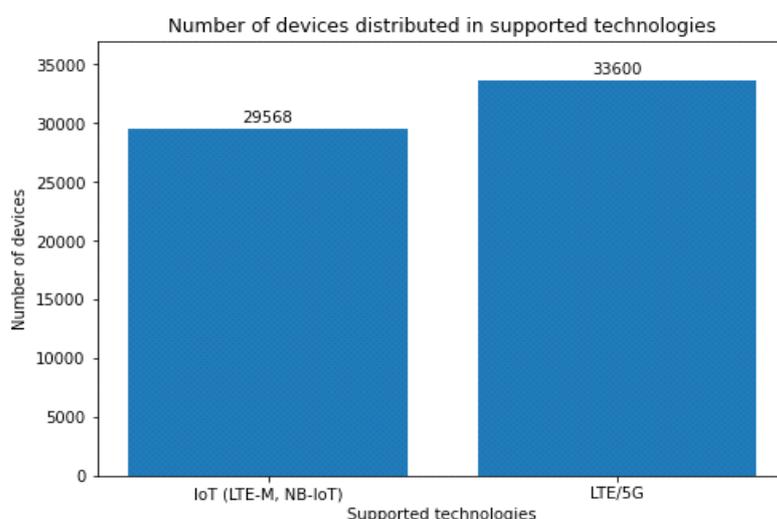


Рис. 3. Количество устройств, распределенных по поддерживаемым технологиям

Видно, что коэффициент распределения двух типов соединений, LTE/5G и IoT (LTE-M, NB-IoT), относительно равномерный, из чего можно сказать, что это хорошее поле.

День (Вход 3)

Данные от 1 до 7, нумерация соответствует дням недели: (1): Понедельник; (2): Вторник; (3): Среда; (4): Четверг; (5): Пятница; (6): Суббота; (7): Воскресенье.

Входные данные, распределенные по дням недели, одинаковы.

Время (Вход 4)

Данные от 0 до 23, что соответствует 24 часам в 1 сутках. Входные данные, распределенные по часам суток, одинаковы.

GBR (Вход 5)

GBR означает гарантированный битрейт, что пользовательскому оборудованию гарантируется установленная скорость передачи данных на предъявителя. Данные состоят только из 1 и 2, соответствующих фактическому значению: (1): GBR; (2): не – GBR (рис. 4).

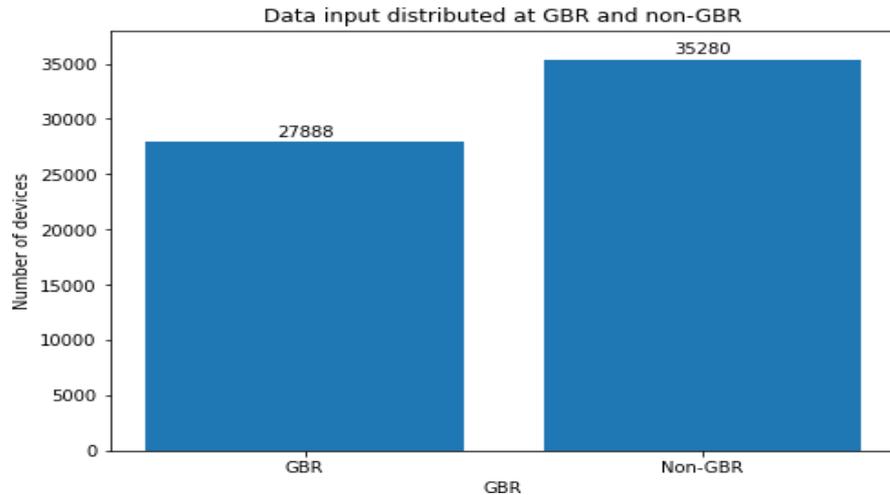


Рис. 4. Ввод данных, распределенный на GBR и не-GBR

Коэффициент потери пакетов (надежность) (вход 6)

Надежность пути коммуникационной сети выражается показателем потери пакетов. Эта метрика равна количеству неполученных пакетов, деленному на общее количество отправлен-

ных пакетов. В полученные данные включены 3 значения. Данные от 1 до 3, пронумерованные, соответствуют следующим значениям: (1): 0.000001; (2): 0.001; (3): 0.01 (рис. 5).

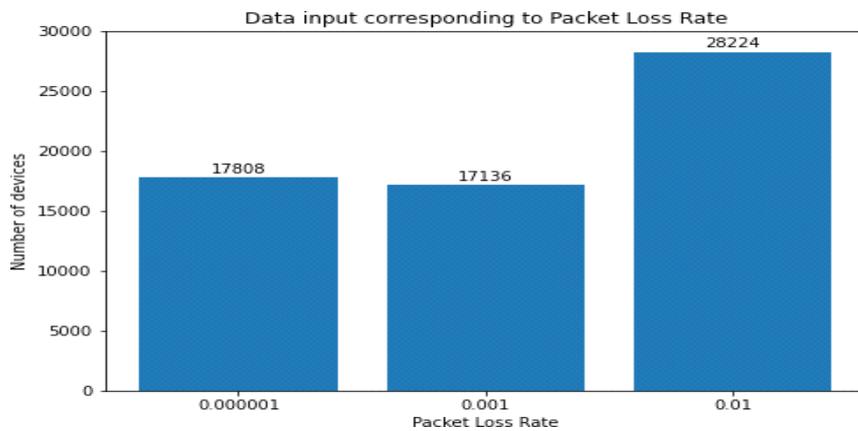


Рис. 5. Входные данные, соответствующие скорости потери пакетов

Имеется 28224 входных данных с высокой надежностью 0,01; 17136 имеют доверительный уровень 0,001; 17808 имеют доверительный уровень 0,000001.

Задержки пакета (задержка) (вход 7)

Пронумерованные параметры задержки соответствуют следующим значениям: (1): 10 мс; (2): 50 мс; (3): 60 мс; (4): 75 мс; (5): 100 мс; (6): 150 мс; (7): 300 мс (рис. 6).

В полученные данные включены только 7 значений.

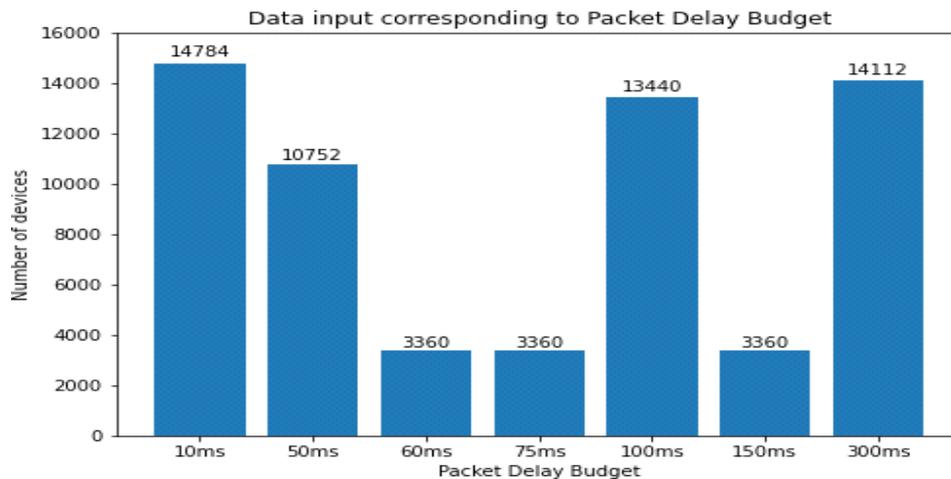


Рис. 6. Входные данные, соответствующие задержке пакетов

Большой объем входных данных имеет задержку в 10 мс, 50 мс, 100 мс, так как смартфон принимает наибольшее количество входных данных, при задержках в 150 мс, 60 мс, 75 мс.

Тип фрагмента (Выход)

Пронумерованные фрагменты соответствуют следующим значениям:

- eMBB – Расширенный мобильный широкополосный доступ (enhanced Mobile Broadband). Аналогично как сети 4G, но его скорость выше, а емкость больше. eMBB поддерживает быстрый рост числа потребительских устройств и смягчает ожидаемое насыщение сетей 4G.

- URLLC – Сверхнадежная связь с низкой задержкой (Ultra Reliable, Low-Latency Communications). URLLC отвечает требованиям вертикальных сегментов рынка, таких как промыш-

ленный, медицинский, транспортный и авиационный, с высокими требованиями к низкой задержке и высокой надежности. Эти новые сценарии использования приходят от заинтересованных сторон, не относящихся к традиционному миру телекоммуникаций, таких как автомобилестроение и энергетика.

- mMTC – Массовая связь машинного типа (Massive Machine-Type Communications). mMTC поддерживает большое количество взаимосвязанных объектов. Не требует высокой скорости передачи данных или низкой задержки. Эти взаимосвязанные объекты предъявляют другие высокие требования, такие как чрезвычайно длительное время автономной работы, малая занимаемая площадь и простота, необходимая для обеспечения возможности подключения практически любого типа объектов (рис. 7).

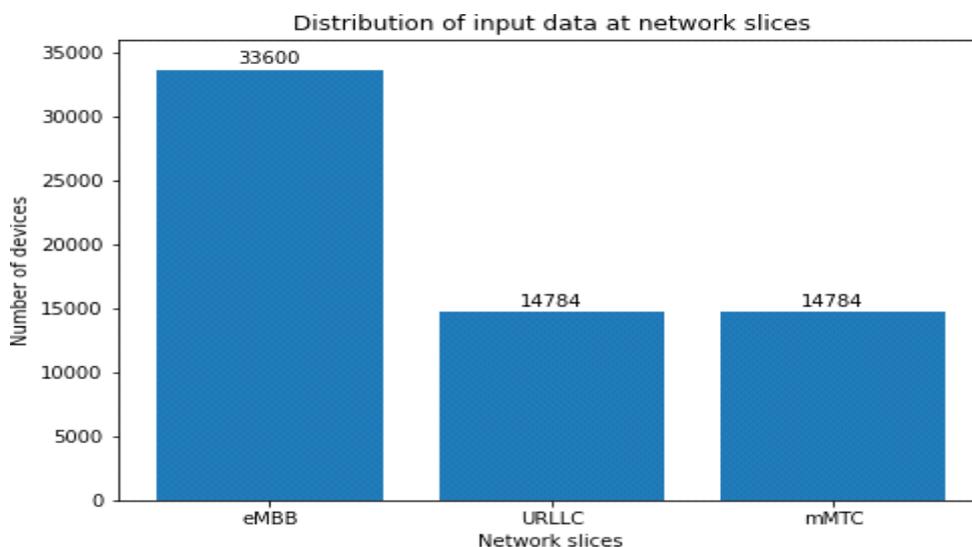


Рис. 7. Распределение входных данных на фрагменте сети

Большое количество входных данных находится в фрагменте eMBB из-за его актуальности для смартфонов, остальные данные распределены по двум фрагментам URLLC, mMTC.

1.2. Нормализация

Нормализация – это метод масштабирования, при котором значения сдвигаются и масштабируются таким образом, что в итоге они оказываются между 0 и 1.

Формула нормализации имеет вид:

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

Здесь X_{\max} и X_{\min} – это максимальное и минимальное значения объекта.

– Когда значение X является наименьшим значением в столбце, числитель будет равен 0, и таким образом X' будет 0;

– С другой стороны, когда значение X является наибольшим значением в столбце, числитель равен знаменателю, и поэтому значение X' равно 1;

– Если значение X находится между минимальным и максимальным значением, значение X' находится между 0 и 1.

Преобразованы выходной сигнал в формат вектора *one hot*. *One-hot* – это группа битов, в которой один старший бит равен 1, а все остальные младшие биты равны 0.

1.3. Модель обучения, результаты и оценка результатов

Модель включает 1 входной слой, 5 скрытых слоев и 1 выходной слой. Поскольку входные данные имеют 3 типа выхода, выходной слой будет трехмерным. Общее количество переменных, подлежащих обучению, составляет 2059. Функции активации включают ReLU, Tanh и последний слой – Softmax.

После запуска модели получена точность 79,87% (рис. 8).

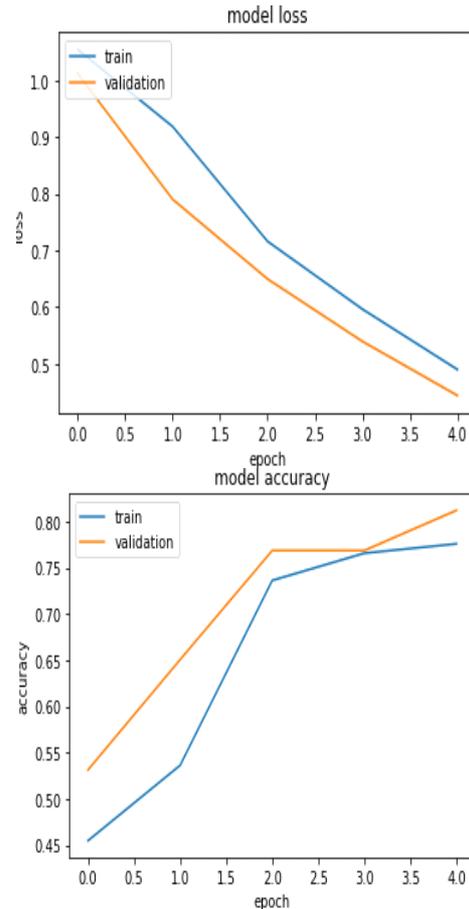


Рис. 8. Обучение и валидация функции потери и точности

Из рис. 8 видно, что эти два графика показывают именно то, что ожидалось от обучающей модели, точность увеличивается, а функции потери уменьшаются, что свидетельствует об оптимизации сгенерированной модели.

Заключение

В статье обработаны входные данные устройства, услуги.

Построена модель обучения для проведения фрагментирования сети.

Проведено фрагментирование сети, в результате чего оптимизированы и выбраны подходящие сетевые фрагменты для устройства и услуги с помощью метода машинного обучения и глубокого обучения.

Литература

1. Zurawski R. RTP, RTCP and RTSP protocols // The industrial information technology handbook CRC Press. 2004. P. 28—70. ISBN 9780849319
2. Perkins C. RTP— Addison. Wesley, 2003. P. 414. ISBN 9780672322495.
3. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system// Wave Electronics and its Application in Information and Telecommuni-

ation Systems (WECONF 2020). 2020. № Access mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9131517>.
Doi:10.1109/WECONF48837.2020.9131517.

4. Богатырев В.А. Информационные системы и технологии. Теория надежности: учеб. пособие для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2016. 318 с.

5. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Redundant Servicing of a Flow of Heterogeneous Requests Critical to the Total Waiting Time During the Multi-path Passage of a Sequence of Info-Communication Nodes// Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). 2020. Vol. 12563. pp. 100-112. DOI 10.1007/978-3-030-66471-89.

6. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths// Journal of Physics Conference Series. 2021. Vol. 1864. 012094. No. 1. pp. 012094. DOI 10.1088/1742-6596/1864/1/012094.

7. Ian Goodfellow, Yoshua Bengio and Aaron Courville. Deep learning// The MIT Press. 2016. 800 p. ISBN: 0262035618.

8. <https://www.nimaia.it/intelligenza-artificiale.php>

9. [online] Available:

<https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/ericsson-mobility-report-november-2018.pdf>.

10. Sunday O. Oladejo, Stephen O. Ekwe, Lateef A. Akinyemi. Multi-Tier Multi-Domain Network Slicing: A Resource Allocation Perspective. 2021. P.1-6. 10.1109/AFRICON51333.2021.9570854.

11. A. Abdulghaffar, A. Mahmoud, M. Abu-Amara, and T. Sheltami, "Modeling and Evaluation of Software Defined Networking Based 5G Core Network Architecture," in IEEE Access, vol. 9, pp. 10179-10198, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3049945.

12. Highly Accurate and Reliable Wireless Network Slicing in 5th Generation Networks: A Hybrid Deep Learning Approach/ S. Khan, S. Khan, Y. Ali et al. // J Netw Syst Manage 30, 29 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10922-021-09636-2>

13. Network Slicing for Critical Communications in Shared 5G Infrastructures - An Empirical Evaluation/ Kurtz, Fabian et al. // 2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft) (2018): 393-399.

14. Abhishek R., Zhao S. and Medhi D. SPArTaCuS: Service priority adaptiveness for emergency traffic in smart cities using software-defined networking// IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). 2016. pp. 1-4

15. Network Slicing for Vehicular Communication/ Hamza Khan, Petri Luoto, Sumudu Samarakoon, Mehdi Bennis, Matti Latva-aho// Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 32. 2021. 10.1002/ETT.3652.

16. Umuralp Kaytaz, Fikret Sivrikaya, Sahin Albayrak. Hierarchical Deep Reinforcement Learning based Dynamic RAN Slicing for 5G V2X. 2021

17. Network slice selection assignment and routing within 5G Networks/ V.K. Choyi, A. Abdel-Hamid, Y. Shah, S. Ferdi and A. Brusilovsky // IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). 2016. pp. 1-7

18. Yoo T. Network slicing architecture for 5G network// International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). 2016. pp. 1010-1014

19. Optimization model for Cross-Domain Network Slices in 5G Networks/ R. Addad, M. Bagaa, T. Taleb, D.L. Cadette Dutra and H. Flinck// IEEE Transactions on Mobile Computing.

20. Rahul Paropkari, Aklilu Gebremichail, Cory Beard. Fractional Packet Duplication and Fade Duration Outage Probability Analysis for Handover Enhancement in 5G Cellular Networks. 298-302. 2019. 10.1109/ICCNC.2019.8685530.

21. Thantharate R. Paropkari, V. Walunj and C. Beard. DeepSlice: A Deep Learning Approach towards an Efficient and Reliable Network Slicing in 5G Networks// IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON). 2019. pp. 0762-0767. DOI: 10.1109/UEMCON47517.2019.8993066.

22. <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>

Поступила 27.10.2022; принята к публикации 13.12.2022

Информация об авторах

Ле Ань Ту - аспирант, факультет программной инженерии и компьютерной техники, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (199034, Россия, Санкт-Петербург, Биржевая линия, 16), e-mail: leanhtutcdt@gmail.com

Во Минь Тхиен Лонг - студент, факультет программной инженерии и компьютерной техники, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (199034, Россия, Санкт-Петербург, Биржевая линия, 16), e-mail: thienlongtpt@gmail.com

Бехруз Данешманд - аспирант, факультет инфокоммуникационных технологий, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (199034, Россия, Санкт-Петербург, Биржевая линия, 16), e-mail: daneshmandbehrooz@gmail.com

THE RATIONALE FOR NETWORK SLICING USING DEEP LEARNING IN WIRELESS NETWORKS (5G/LTE)

T. Le Anh, T.L. Vo Minh, B. Daneshmand

Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics (ITMO University), St. Petersburg, Russia

Abstract: now and in the future, 5G mobile networks, mobile communications and wireless networks must meet the standards of low latency, high reliability, increased capacity, greater security and fast user connection. Mobile operators are

constantly looking for solutions that allow multiple independent subscribers to operate on the same 5G network. One such solution is the use of Network Slicing (NS) technology to allocate finite network resources on the same physical infrastructure. Data-driven decision making is critical for future communications networks due to the exploding traffic growth. To effectively manage the distribution of network resources and network availability, machine and deep learning in the network was used. We used key performance indicators (Key Performance Indicators - KPIs) to analyze incoming traffic and predict fragments of network resources for the distribution of unknown devices. Intelligent resource allocation allows you to effectively use the available resources on existing network fragments and provide high load balancing. The model used makes an intelligent decision and selects the most appropriate network fragment

Key words: Network Slicing (NS), Key Performance Indicators (KPIs), deep learning, normalization, Software-Defined Networking (SDN)

References

1. Zurawski R. "RTP, RTCP and RTSP protocols", The industrial information technology handbook, CRC Press, 2004, pp. 28—70. ISBN 9780849319
2. Perkins C. "RTP—Addison", Wesley, 2003, 414 p. ISBN 9780672322495.
3. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. "The probability of timeliness of a fully connected exchange in a redundant real-time communication system", *Wave Electronics and its Application in Information and Tele-communication Systems (WECONF 2020)*, 2020, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9131517>. Doi:10.1109/WECONF48837.2020.9131517.
4. Bogatyrev V.A. "Information systems and technologies. Reliability theory" ("Informatsionnye sistemy i tekhnologii. Teoriya nadezhnosti"), textbook, Moscow: Yurait, 2016, 318 p.
5. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. "Redundant servicing of a flow of heterogeneous requests critical to the total waiting time during the multi-path passage of a sequence of info-communication nodes", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2020, vol. 12563, pp. 100-112. DOI 10.1007/978-3-030-66471-89.
6. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. "Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths", *Journal of Physics. Conference Series*, 2021, vol. 1864, no. 1, pp. 012094. DOI 10.1088/1742-6596/1864/1/012094.
7. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. "Deep learning", The MIT Press, 2016, 800 p., ISBN: 0262035618.
8. <https://www.nimaia.it/intelligenza-artificiale.php>
9. <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/ericsson-mobility-report-november-2018.pdf>
10. Oladejo S.O., Ekwe S.O., Akinyemi L.A. "Multi-tier multi-domain network slicing: a resource allocation perspective" 2021, no. 1-6, 10.1109/AFRICON51333.2021.9570854.
11. Abdulhaffar A., Mahmoud A., Abu-Amara M., Sheltami T. "Modeling and evaluation of software defined networking based 5G core network architecture", *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 10179-10198. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049945.
12. Khan S., Khan S., Ali Y. et al. "Highly accurate and reliable wireless network slicing in 5th generation networks: a hybrid deep learning approach", *J Netw Syst Manage* 30, 2022, no. 29, available at: <https://doi.org/10.1007/s10922-021-09636-2>
13. Kurtz F. et al. "network slicing for critical communications in shared 5G infrastructures - an empirical evaluation", *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*, 2018, pp. 393-399.
14. Abhishek R., Zhao S., Medhi D. "SPArTaCuS: Service priority adaptiveness for emergency traffic in smart cities using software-defined networking", *IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, 2016, pp. 1-4
15. Hamza Khan, Petri Luoto, Sumudu Samarakoon, Mehdi Bennis, Matti Latva-aho "Network slicing for vehicular communication", *Transactions on Emerging Tele-communications Technologies*, 2021, no. 32, 10.1002/ETT.3652.
16. Umuralp Kaytaz, Fikret Sivrikaya, Sahin Albayrak "Hierarchical deep reinforcement learning based dynamic RAN slicing for 5G V2X", 2021
17. Choyi V.K., Abdel-Hamid A., Shah Y., Ferdi S., Brusilovsky A. "Network slice selection assignment and routing within 5G Networks", *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 2016, pp. 1-7
18. Yoo T. "Network slicing architecture for 5G network", *International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2016, pp. 1010-1014
19. Addad R., Bagaa M., Taleb T., Cadette Dutra D.L., Flinck H. "Optimization model for cross-domain network slices in 5G networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*.
20. Rahul Paropkari, Aklilu Gebremichail, Cory Beard "Fractional packet duplication and fade duration outage probability analysis for handover enhancement in 5G cellular networks", 2019, pp. 298-302, 10.1109/ICCNC.2019.8685530.
21. Thantharate R. Paropkari, Walunj V., Beard C. "DeepSlice: A deep learning approach towards an efficient and reliable network slicing in 5G networks", *IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, 2019, pp. 0762-0767. DOI: 10.1109/UEMCON47517.2019.8993066.
22. <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>

Submitted 27.10.2022; revised 13.12.2022

Information about the authors

Le Anh Tu, graduate student, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (16 Birzhnevaya lane, St. Petersburg 199034, Russia), e-mail: leanhtutcdt@gmail.com

Vo Minh Thien Long, student, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (16 Birzhnevaya lane, St. Petersburg 199034, Russia), e-mail: thienlongtpct@gmail.com

Behrooz Daneshmand, graduate student, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (16 Birzhnevaya lane, St. Petersburg 199034, Russia), e-mail: daneshmandbehrooz@gmail.com

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

А.С. Костюков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: разработку различных электронных устройств невозможно представить в современном мире без использования полупроводниковых элементов. Данные элементы обладают рядом неоспоримых преимуществ и наиболее востребованы в современной электронной промышленности. В связи со всем вышеперечисленным остро встает вопрос о тестировании и определении показателей надежности полупроводниковых элементов с целью отсеивания бракованных компонентов. На сегодняшний день существует несколько способов определения надежности данных элементов. Представлен один из таких методов определения надежности, основанный на статистических алгоритмах расчета. На основе показанного метода была разработана новая усовершенствованная методика определения надежности. В частности, в новой методике учитываются первоначальные данные статистической выборки, а также включен в расчет ряд дополнительных показателей. Представлены результаты расчетов показателей надежности микроконтроллеров семейства ATmega как по новому способу определения, так и по старой методике расчета. По полученным результатам было произведено сравнение с эталонными значениями, взятыми из конструкторской документации на устройства. В результате данного сравнения было выявлено, что разработанная методика определения надежности позволяет получать значения комплексных коэффициентов с погрешностью в $\pm 10\%$ в сравнении с эталонными значениями

Ключевые слова: надежность, полупроводниковый элемент, ATmega, время безотказной работы

Введение

В конструкции современных радиоэлектронных устройств различного назначения большое распространение получили полупроводниковые элементы (диоды, транзисторы, интегральные микросхемы, микроконтроллеры, микропроцессоры и т.п.). Как и любые электронные элементы, данный класс компонентов подвержен отказам и поломкам, в связи с этим в промышленном производстве остро стоит вопрос о тестировании и определении их работоспособности. На сегодняшний день существует несколько способов определения надежности данных элементов, наиболее распространенным из которых является апостериорный анализ надежности. Данный метод относится к способу определения параметрической надежности, и основан на применении статистических алгоритмов с использованием в качестве начальных данных для расчетов широкую числовую выборку [1]. Рассмотрим наиболее часто используемый алгоритм определения работоспособности, который относится к данному методу.

Используемый метод определения работоспособности

Основной особенностью представленного алгоритма является использование статистической выборки начальных данных, которые обычно получают с определенной серии устройств (элементов), путем их испытания наработку на отказ. Конкретнее в выбранном алгоритме рассматриваются следующие параметры надежности.

Коэффициент влияния относительной погрешности i -го элемента:

$$B_i = \frac{\left(\frac{\Delta y}{y_{\text{ном}}}\right)_{\text{доп}} \left(1 - \frac{x_{\text{гр}}}{x_{\text{гро}}}\right)}{\frac{\Delta x_i}{x_i}}, \quad (1)$$

где $\Delta y/y_{\text{ном}}$ – относительное изменение выходного параметра, $\Delta x_i/x_i$ – относительное изменение i -го параметра, $\Delta x_{\text{гр}}/x_{\text{гро}}$ – относительное изменение граничного параметра при изменении исследуемого параметра на величину $\Delta x_i/x_i$, $x_{\text{гро}}$ – относительное изменение граничного параметра.

Коэффициент влияния относительно погрешности питающего напряжения

$$B_{\text{унум}} = \frac{\left(\frac{\Delta y}{y_{\text{ном}}}\right)_{\text{доп}}}{u_{\text{нумгр.о}}}, \quad (2)$$

где $u_{numpr.o}$ - относительное изменение питающего напряжения.

Уравнение относительной погрешности выходного параметра электронного средства, в котором учитываются все вышепредставленные коэффициенты для каждого отдельного случая

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n B_i \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (3)$$

Математическое ожидание коэффициента старения выходного параметра электронного средства

$$M(C) = \sum_{i=1}^n B_i \cdot M(Cg_i), \quad (4)$$

где $M(Cg_i)$ - математическое ожидание коэффициента старения i -элемента.

Половина поля допуска коэффициента старения i -элемента

$$\delta(C) = v \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \cdot \delta^2(Cg_i)}, \quad (5)$$

где $\delta(Cg_i)$ - половина поля допуска коэффициента старения i -элемента, v - коэффициент гарантированной надежности обеспечения допусков.

Предельное значение коэффициента старения выходного параметра

$$C_{np} = \sum M(C) \pm \sum \delta(C). \quad (6)$$

Время наработки на отказ

$$\Delta \tau = \frac{\frac{\Delta y}{y} - B_{unum} \frac{\Delta U_{num}}{U_{num}}}{C_{np}} \quad (7)$$

где $\frac{\Delta U_{num}}{U_{num}}$ - отношение относительного изменения выходного и входного напряжений.

Допуск на старение

$$\Delta_{cm} = M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{cm} \pm \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{cm} = C_{np} \Delta \tau, \quad (8)$$

где $M(\Delta y/y)_{cm}$ - математическое ожидание допуска на старение, $\delta((\Delta y/y))$ - половина поля

допуска на старение, $\Delta \tau$ - время наработки на отказ.

Величина производственного допуска с учетом допуска на старение

$$|\Delta K_{np}| = |\Delta K|_{npzad} - |\Delta_{cm}| \quad (9)$$

где $|\Delta K|_{npzad}$ - заданный по техническим условиям производственный допуск.

Представленная методика определения коэффициентов надёжности в настоящий момент используется в промышленном производстве, например, она рассматривается в работах [2,3]. Особенностью представленного метода определения надёжности является нахождение граничного параметра и области безотказной работы, связанной с ним, выход характеристик исследуемого устройства за пределы данной области является критичным. Главным недостатком данного способа является необходимость использования большой выборки начальных данных, полученных с помощью макетов или уже готовых устройств. Из-за этого для реализации расчета по данному способу требуется большое количество времени и ресурсов, а также наличие квалифицированного персонала, что делает очень трудозатратным представленный метод определения надёжности.

В ходе многочисленных проведенных исследований на основе показанной методики была выведена новая более усовершенствованная форма, подробнее о которой изложено ниже в статье.

Разработанный метод определения работоспособности

Как и ранее в рассматриваемой методике необходимо первоначально определить статистическую выборку, далее находится среднее арифметическое значение показателей, а также максимальное и минимальное значения выборки. Автором предложено рассчитывать коэффициент влияния относительной погрешности (1) другим способом, нежели в ранее рассматриваемом методе. Теперь он является общим показателем для всей выборки в целом, а не как в ранее рассматриваемой методике одиночным коэффициентом для отдельного случая.

$$B = \frac{(x_{max} - x_{min}) - x_{nom}}{(3,3x_{max} - x_{min}) - 2,4x_{nom}}, \quad (10)$$

где x_{max} - максимальное значение выборки, x_{min} - минимальное значение выборки, x_{nom} - среднее арифметическое значение выборки.

Коэффициент влияния относительной погрешности питающего напряжения (2) приведен к следующему виду

$$B_{pit} = \frac{(x_{max} - x_{min}) - x_{nom}}{U_{pit} \cdot x_{nom}}, \quad (11)$$

где U_{pit} - напряжение питания изучаемого устройства.

Автором предложено внедрить в методику расчета ряд дополнительных параметров для повышения точности данных. А именно, в методику был введен коэффициент работоспособности, он же коэффициент вероятности безотказной работы устройства

$$p = \frac{n - r}{n}, \quad (12)$$

где r - количество измерений, результаты которых выходят за пределы ранее установленных допусков, n - общее количество измерений.

Был введен параметр времени безотказной работы

$$T_0 = \frac{t(n + (n - r))}{0,0072 \cdot r}, \quad (13)$$

где t - время измерений.

Выведен дополнительно коэффициент старения устройства

$$C_i = \frac{7200((3,3x_{max} - x_{min}) - 2,4x_{nom})}{t \cdot x_{nom}}. \quad (14)$$

Внедрение представленных параметров надежности позволяет расширить область исследований, а также увеличить точность оценки надежности исследуемого изделия, благодаря использованию дополнительных данных.

Уравнение относительной погрешности выходного параметра (3) доработано до вида

$$X = \frac{2(x_{max} - x_{min})}{x_{nom}} - 2. \quad (15)$$

Математическое ожидание коэффициента старения выходного параметра (4) было заме-

нено на систематическую составляющую суммарной погрешности

$$M(C) = \frac{((x_{max} - x_{min}) - x_{nom}) \cdot (n - r)}{((3,3x_{max} - x_{min}) - 2,4x_{nom}) \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (16)$$

Вместо половины поля допуска коэффициента старения (5) учитывается случайная составляющая погрешности

$$\sigma(C) = \sqrt{\left[\frac{(x_{max} - x_{min}) - x_{nom}}{(3,3x_{max} - x_{min}) - 2,4x_{nom}} \right]^2 + \left[t_{ct} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{nom})^2}{n \cdot (n - 1)}} \right]^2}, \quad (17)$$

где t_{ct} - коэффициент Стьюдента.

Предельное значение коэффициента старения (6) преобразовано к виду

$$C_{np} = M(C) \pm \sigma(C). \quad (18)$$

Допуск на старение (8) теперь рассчитывается как

$$\Delta C_t = \frac{C_{np} \cdot t}{3600}. \quad (19)$$

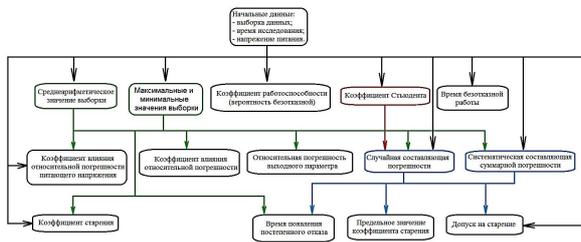
Время наработки на отказ (7) было решено привести к виду

$$\Delta t = \frac{(x_{max} - x_{min}) - x_{nom}}{x_{nom} \cdot (M(C) \pm \sigma(C))}. \quad (20)$$

В качестве начальных данных для определения надежности используются вольтамперные характеристики исследуемого устройства или элемента, которые, в свою очередь, можно получить непосредственно с самого прибора (элемента). Помимо вольтамперных характеристик также необходимо учитывать время, которое было затрачено на проведение измерений, напряжение питания исследуемого устройства, а также коэффициент Стьюдента.

Для лучшего понимания представленной выше методики на рисунке приведен подробный алгоритм для полноценной и правильной реализации решения методики определения

надежности полупроводниковых элементов и устройств.



Алгоритм разработанной методики

Пример анализа надежности

Для выявления более точного метода определения надежности необходимо произвести сравнительный анализ данных, полученных в результате расчетов по представленным методикам. Для более грамотного сравнительного анализа в статье будут приведены результаты только тех параметров и коэффициентов, которые присутствуют в обоих методах, а именно:

- коэффициент влияния относительной погрешности;
- коэффициент влияния относительной погрешности питающего напряжения;
- относительная погрешность выходного параметра;

- предельное значение коэффициента старения;
- допуск на старение;
- время наработки на отказ.

В качестве исследуемых устройств были выбраны микроконтроллеры семейства ATmega, а именно ATmega328P, ATmega2560, ATmega16U2, ATmega32u4 и ATmega168.

Данные приборы были выбраны в связи с тем, что являются наиболее распространенными микросхемами, используемыми в производстве электронной аппаратуры, в частности, подобные микроконтроллеры применяются в различных микрокомпьютерах и платах управления, например Ардуино или Плис. Как следствие, найти техническую документацию на представленные устройства с необходимыми параметрами не представляет особого труда, что, в свою очередь, позволит сравнить полученные результаты расчета надежности с эталонными значениями, указанными в технической документации.

Результаты исследования комплексных показателей надежности, полученных в результате расчетов по приведенным ранее формулам, представлены ниже в таблице. Данные эталонных значений для исследуемых устройств взяты из [4].

Комплексные показатели надежности микроконтроллеров семейства ATmega

	ATmega328P	ATmega2560	ATmega16U2	ATmega32u4	ATmega168
Старая методика					
Коэффициент влияния относительной погрешности (B)	0,7794	0,195	0,91	0,233	0,205
Коэффициент влияния относительной погрешности питающего напряжения (B)	0,065	0,057	0,052	0,111	0,032
Относительная погрешность выходного параметра (B)	1,168	1,029	0,93	1,998	0,577
Предельное значение коэффициента старения	1,08	3,8	3,7	6,2	2,1
Допуск на старение	0,0271	0,0046	0,0046	0,0072	0,00322
Время наработки на отказ (ч)	1381900	1088000	1667000	1877570	1087960
Новая методика					
Коэффициент влияния относительной погрешности (B)	0,853	0,234	1,051	0,282	0,191
Коэффициент влияния относительной погрешности питающего напряжения (B)	0,071	0,059	0,057	0,121	0,041

Относительная погрешность выходного параметра (В)	1,221	1,111	1,028	2,113	0,591
Предельное значение коэффициента старения	1,121	3,951	3,911	7,121	2,251
Допуск на старение	0,029	0,0051	0,049	0,0075	0,0038
Время наработки на отказ (ч)	1405381	1181645	1681612	1900516	1191512
Эталонные значения					
Коэффициент влияния относительной погрешности (В)	0,9	0,2	1	0,3	0,2
Коэффициент влияния относительной погрешности питающего напряжения (В)	0,07	0,06	0,06	0,12	0,04
Относительная погрешность выходного параметра (В)	1,3	1,1	1,1	2,2	0,6
Предельное значение коэффициента старения	1,2	4	4	7	2,3
Допуск на старение	0,03	0,005	0,005	0,008	0,004
Время наработки на отказ (ч)	1400000	1200000	1700000	1900000	1200000

Анализируя данные из таблицы, можно заметить, что результаты расчета надежности в зависимости от исследуемого микроконтроллера незначительно разнятся.

Проверяя данные, можно заметить закономерность в отношении полученных результатов. Так, значения, полученные в результате расчета по новой методике определения надежности, незначительно разнятся с эталонными значениями, взятыми из технической документации. Из этого можно прийти к выводу, что разработанная методика позволяет рассчитывать довольно точные показатели надежности с погрешностью в $\pm 10\%$. В современной науке данное соотношение считается неплохим результатом метрологической погрешности.

Данные показатели достигаются благодаря учету первоначальных данных статистической выборки в виде среднеарифметического значения, минимального и максимального значения выборки. А также внедрению в методику расчета дополнительных параметров, таких как вероятность безотказной работы, коэффициента старения, времени безотказной работы. Также в новой методике учитываются значения одного из важнейших статистических критериев – коэффициента Стьюдента.

Исходя из приведенных данных, можно сделать заключение о том, что разработанную методику для определения надежности полу-

проводниковых элементов можно рекомендовать к использованию на технических производствах.

Заключение

В результате проведенного научного исследования были рассмотрены современные способы определения надежности полупроводниковых элементов и устройств. В частности, в статье представлена методика определения надежности, которая относится к определению параметрической надежности и основана на применении статистических данных. На основе представленного способа была разработана новая методика определения надежности полупроводниковых элементов, которая, как и прошлая версия, учитывает применение статистических алгоритмов.

В новую разработанную методику был внесен ряд значительных изменений. В частности, при расчете коэффициентов надежности учитываются первоначальные данные статистической выборки. Также в методику были введены дополнительные параметры. Данные изменения позволили повысить точность рассчитываемых показателей.

В конце представлены результаты расчетов параметров надежности, как по новой разработанной методике, так и по старому способу определения. В качестве исследуемых объектов были выбраны микроконтроллеры се-

мейства ATmega. Данный выбор был обусловлен распространенностью представленных микроконтроллеров и наличия на них в свободном доступе конструкторской документации. По полученным результатам расчета было произведено сравнение с эталонными значениями, взятыми из конструкторской документации на устройства.

В результате проведенных исследований было выявлено, что погрешность расчетов надежности, согласно новой разработанной методике, составляет $\pm 10\%$ в сравнении с эталонными значениями, что является нормальной погрешностью в метрологических измерениях. Из полученных результатов исследования было сделано заключение, что разработанную методику определения надежности полупроводниковых элементов и устройств можно рекомендовать к использованию на промышленных предприятиях.

Литература

1. Чернышев А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.
2. Федоров В.К., Сергеев Н.П., Кондрашин А.А. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / под ред. В.К. Федотова. М.: Техно-сфера, 2005. 205 с.
3. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС. М.: Высш. шк., 1991. 336 с.
4. 8-bit AVR Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes IN-System Programmable Flash. ATMEL, 2010. 32 с.

5. Костюков А.С., Башкиров А.В., Никитин Л.Н. Усовершенствование методики проведения граничных и матричных испытаний // Проблемы обеспечения надёжности и качества приборов, устройств и систем: сб. науч. тр. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2019. С. 27 – 35.

6. Бардин В.М., Пьязин Д.К., Брагин А.В. К вопросу о методологии оценки надежности силовых полупроводниковых приборов // Силовая электроника. 2018. №6. С. 46 – 48.

7. Methods for analyzing the reliability of mounting microelectronic radio components / A.S. Kostyukov, A.V. Bashkirov, V.V. Glotov, N.V. Astakhov, A.S. Demikhova // Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021". 2021. 2032 (1), статья № 012115.

8. Статистические методы определения надежности / А.А. Затонский, Д.Р. Елкин, А.С. Костюков, Э.Э. Каграманов, В.С. Стёпин // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2021. Т. 2. С. 155-156.

9. Костюков А.С., Башкиров А.В. Программная система для определения надежности радиоэлектронных устройств // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021. С. 183-185.

10. Comparative analysis of software products for virtual simulation of electrical circuits / A.V. Bashkirov, V.V. Glotov, A.S. Kostyukov, A.B. Antilikatorov, Y.S. Balashov // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2020). 2020. Vol. 329. p. 03018-03021

Поступила 28.10.2022; принята к публикации 13.12.2022

Информация об авторах

Костюков Александр Сергеевич – ассистент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETRIC RELIABILITY OF SEMICONDUCTOR DEVICES

A.S. Kostyukov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in the modern world, development of various electronic devices cannot be imagined without the use of semiconductor elements. These elements have a number of undeniable advantages, and are most in demand in the modern electronics industry. In connection with all of the above, the question of testing and determining the reliability indicators of semiconductor elements is acute in order to screen out defective components. To date, there are several ways to determine the reliability of these elements. The article presents one of such methods for determining reliability, based on statistical calculation algorithms. Based on the method shown, I developed a new improved method for determining reliability. In particular, the new methodology takes into account the initial data of the statistical sample, and also includes a number of additional indicators in the calculation. At the end of the article, I give the results of calculations of the reliability indicators of microcontrollers of the ATmega family, both according to the new method of determination, and according to the old calculation method. Based on the results obtained, I made a comparison with the reference values taken from the design documentation for the devices. As a

result of this comparison, I revealed that the developed method for determining the reliability allows obtaining the values of complex coefficients with an error of $\pm 10\%$ in comparison with the reference values.

Key words: reliability, semiconductor element, ATmega, uptime

References

1. Chernyshev A.A. "Fundamentals of the reliability of semiconductor devices and integrated circuits" ("Osnovy nadezhnosti poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem"), Moscow: Radio I svyaz', 1988, 256 p.
2. Fedorov V.K., Sergeev N.P., Kondrashin A.A. "Control and testing in the design and production of radio electronic equipment" ("Kontrol' i ispytaniya v proyektirovani i proizvodstve radioelektronnykh sredstv"), Moscow: Tekhnosfera, 2005, 205 p.
3. Gludkin O.P. "Methods and devices for testing RES and EVS" ("Metody i ustroystva ispytaniy RES i EVS"), Moscow: Vysshaya shkola, 1991, 336 p.
4. "8-bit AVR Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes IN-System Programmable Flash", ATMEL, 2010, 32 p.
5. Kostyukov A.S., Bashkirov A.V., Nikitin L.N. "Improvement of the methodology for carrying out boundary and matrix tests", *Collection of articles: Problems of Ensuring the Reliability and Quality of Devices and Systems (Problemy obespecheniya nadozhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem: sb. nauch. tr.)*, Voronezh State Technical University, 2019, pp. 27-35.
6. Bardin V.M., Pyazin D.K., Bragin A.V. "On the question of the methodology for assessing the reliability of power semiconductor devices", *Power Electronics (Silovaya elektronika)*, 2018, no. 6, pp. 46-48.
7. Kostyukov A.S., Bashkirov A.V., Glotov V.V., Astakhov N.V., Demikhova A.S. "Methods for analyzing the reliability of mounting microelectronic radio components", *Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021"*, 2021, no. 2032 (1), article no. 012115.
8. Zatonskiy A.A., Elkin D.R., Kostyukov A.S., Kagramanov E.E., Stepin V.S. "Statistical methods for determining reliability", *Proc. of Int. Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo)*, Penza State University, 2021, vol. 2, pp. 155-156.
9. Kostyukov A.S., Bashkirov A.V. "Software system for determining the reliability of radio electronic devices", *Scientific Support of the Voronezh Region: Coll. of papers of the winners of the competition of research works of students and graduate students of VSTU in priority areas of science and technology development (Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti: sb. tr. pobediteley konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov i aspirantov VGTU po prioritetyim napravleniyam razvitiya nauki i tekhnologii)*, Voronezh State Technical University, 2021, pp. 183-185.
10. Bashkirov A.V., Glotov V.V., Kostyukov A.S., Antikatorov A.B., Balashov Yu.S. "Comparative analysis of software products for virtual simulation of electrical circuit", *Int. Conf. on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2020)*, 2020, vol. 329, p. 03018-03021

Submitted 28.10.2022; revised 13.12.2022

Information about the author

Aleksandr S. Kostyukov, assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.6.016

УДК 62-213-6

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.И. Максименков¹, М.В. Молод¹, Д.С. Гребенников²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество», г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены вопросы применения композиционных материалов в отечественных и зарубежных самолётах. Показаны их преимущества, обеспечивающие решение вопросов по снижению веса и повышению прочности деталей, узлов, агрегатов и в целом изделия. В то же время отмечены недостатки, связанные с низкой ударной стойкостью, что снижает эффективность их применения в высоконагруженных зонах планера. Одно из направлений решения данного вопроса – это применение в конструкциях металлополимерных композиционных материалов (МПКМ). Сформулированы цель и задачи исследования. Приведены варианты изготовления МПКМ, которые представляют собой сочетание алюминиевых заготовок и ПКМ. Учитывая, что ПКМ имеет низкую пластичность - 1-2 %, то рассмотрен процесс раздельного деформирования алюминиевого листа и ПКМ. Формообразование алюминиевого листа осуществляли методом обтяжки. Применяемый обтяжной пуансон изготавливали из алюминиевого сплава методом литья, который после обработки обеспечивал процесс формообразования листа на заданную кривизну с последующим его использованием для выкладки и термостатирования в автоклаве. Одна из важных решаемых задач – это обеспечение равномерности деформаций и обеспечение стабильных свойств в полученной заготовке при обтяжке. Это достигается за счёт снижения трения на поверхности пуансона с использованием решения, приведенного в патенте №2459680. Проведен анализ формообразования образцов из ПКМ. Разработан технологический процесс изготовления деталей из МПКМ, который включает все этапы: от получения заготовки до процесса обтяжки, последующей выкладки, термостатирования и контроля готовой детали. Приведены результаты испытания на растяжение образцов из МПКМ – алюминиевого – Д16чАТ, из ПКМ и МПКМ, которые показали прочностные и пластические характеристики испытываемых материалов. Проведен весовой расчёт составляющих элементов МПКМ, который выявил весовую эффективность разработанной конструкции МПКМ по сравнению с Д16чАТ. Выявлено повышение прочности обшивки из МПКМ и снижение веса больше чем на 20%. Применение данной технологии изготовления МПКМ позволяет обеспечить повышение качества получаемых деталей требуемой точности

Ключевые слова: пуансон, обшивка МПКМ, трение, углепластик, оборудование с ЧПУ

Введение

Развитие отечественной и зарубежной авиационной техники требует поиска новых решений по снижению веса, повышению прочности конструктивных элементов, обеспечению ресурса изделия. Так, в последнее время для решения этих задач применяют композиционные материалы КМ [1]. В отечественных самолётах доля ПКМ составляет более 35%, в зарубежных более 50%.

Применение ПКМ обеспечивает:

- высокую удельную прочность, позволяющую снизить вес планера на 20-40%;

- возможность получения деталей, узлов, панелей и агрегатов с требуемыми свойствами.

Однако низкая ударная стойкость ПКМ снижает эффективность их применения в некоторых зонах планера. Низкий уровень пластичности не позволяет осуществлять формообразование ПКМ сложной геометрической формы.

Проведенные исследования выявили высокую пластичность металлических материалов, входящих в состав МПКМ, и ограниченную степень деформации ПКМ.

Постановка задачи

С целью расширения технологических возможностей ПКМ, применения их в конструкциях летательных аппаратов рассмотреть варианты применения

металлических листов в сочетании с ПКМ, т.е. металлокомпозитов (МПКМ).

Варианты изготовления МПКМ

На рис. 1 представлена схема образца двухслойного листового металлополимерного композита (алюминий-углепластик) МПКМ.

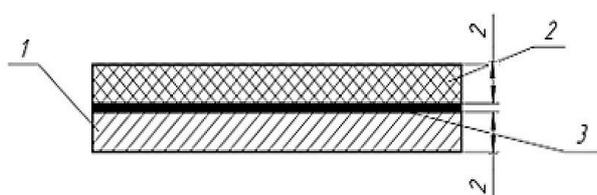


Рис. 1:

1. Алюминиевый лист Д16чАТ толщиной 2 мм.
2. Лист ПКМ полимерного композиционного материала-углепластика толщиной 2 мм.
3. Клеящее плёночное связующее ВК36РТ

Сочетание слоёв алюминиевого сплава и углепластика, связующего ВК36РТ, позволяет получить МПКМ.

Рассмотрим формообразование металлического листа из МПКМ (рис. 1) для придания требуемой геометрической формы.

Металлические слои из алюминиевого сплава Д16АТ обладают высокой степенью пластичности, предельная степень деформации их от 18 до 24%. Волокна ПКМ, имеющие высокую жёсткость и малую пластичность, ограничивают реализацию пластических свойств металлических слоёв.

В связи с этим основной операцией формообразования МПКМ является операция гибки на большие радиусы кривизны. При этом возможно появление браковочных признаков в виде расслоения слоёв ПКМ.

Из приведённых экспериментальных исследований выявлено, что предельные деформации на растяжение ПКМ колеблются от 1 до 2%.

Кроме низкой деформируемости ПКМ гетерогенность структуры вызывает значительный разброс механических характеристик, и как следствие, значительное и нестабильное состояние при формообразовании, снижая точность изготовления деталей. Применение широко используемой термической обработки для повышения пластичности листовых металлов для ПКМ неприемлемо из-за наличия органических волокон и связующего.

В связи с вышеизложенным необходимо изыскание способов изготовления деталей из

МПКМ, которые позволяют получать детали одинарной и двойной кривизны с заданной точностью.

Способы раздельного изготовления деталей из металлического листа и из ПКМ

Процесс изготовления металлического листа осуществляется методом обтяжки на оборудовании с ЧПУ для получения заданной геометрической формы [4].

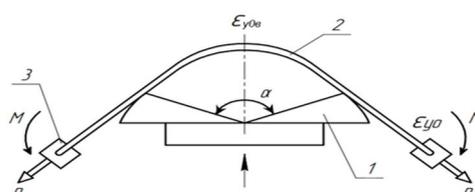


Рис. 2:

1. Пуансон. 2. Заготовка. 3. Зажимы

При этом на характер деформации оказывает влияние трение в зоне контакта заготовки с пуансоном [6].

Рассмотрим характер деформации на вершине пуансона ϵ_{y0B} и на сходе заготовки с пуансона, и между зажимами прессы ϵ_{y0} , который определяется по зависимости

$$e_{y0} = e_{y0B} \times \left(\frac{M\alpha}{2n} \right)$$

где e_{y0} - деформация на сходе заготовки;

e_{y0B} - деформация заготовки на вершине пуансона;

M - коэффициент трения;

α - угол охвата заготовкой пуансона;

n - коэффициент упрочнения заготовки.

С целью повышения точности процесса формообразования разработан способ [5], позволяющий уменьшить трение на поверхности пуансона [7], при этом снижение трения способствует повышению равномерности деформации и получению заготовки заданной точности. Результаты экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

ϵ_{y0}	ϵ_{y0B}	μ	n	α , рад.	R , мм
0,059	0,05	0,017	0,12	2,62	1500

Обеспечивая выравнивание деформации на поверхности заготовки, исключая её утонение, можно говорить о стабильных механических характеристиках заготовок, полученных обтяжкой на прессах с ЧПУ.

Полученная обшивка методом обтяжки была использована как оснастка для получения ПКМ методом выкладки. Оснастка для процесса выкладки включает: обтяжной пуансон, обшивку, полученную методом обтяжки.

Материал пуансона - алюминиевый сплав. Пуансон получают методом литья с последующим фрезерованием, шлифованием и полированием. Пуансон оборудован средствами для процесса отверждения в автоклаве.

Технологический процесс изготовления слоя из ПКМ осуществляли по обшивке, зафиксированной на пуансоне выкладкой на установке Vipez1200-FPS, которая позволяет осуществлять процесс изготовления заготовки с обеспечением требуемой точности.

Схема технологического процесса изготовления обшивки из МПКМ приведена на рис. 3.

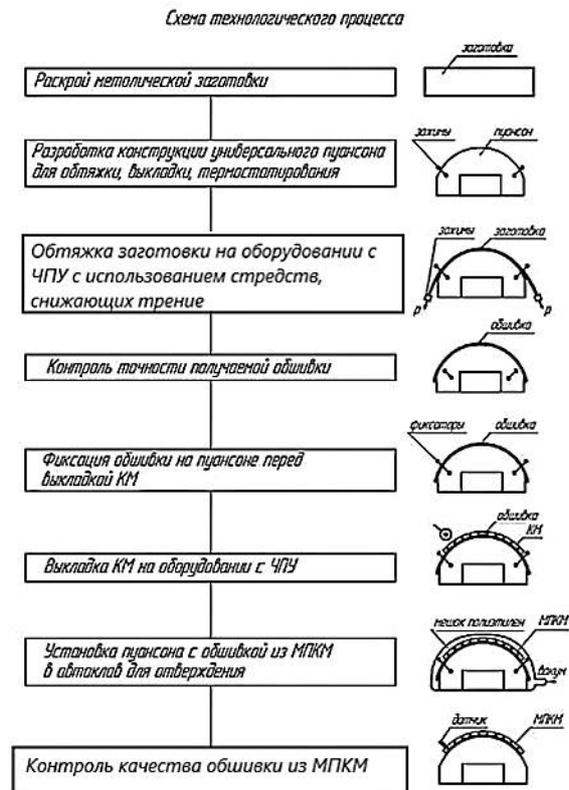


Рис. 3

Разработанный технологический процесс требует проведения экспериментальных исследований по оценке механических характеристик и весовых параметров образцов металлических ПКМ и МПКМ.

Экспериментальные исследования

Образцы из Д16чАТ испытывали на растяжение согласно ГОСТ 1497-84 с записью диаграмм на Р-10. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Материал	Толщина, мм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	ϵ_B , %	$\epsilon_{0,2}$, %	l	K, МПа
Д16чАТ	2	463	331	17,9	1,18	0,12	570
КМУ	2	800		1,2			

При испытании на растяжение образцов из ПКМ использовали ГОСТ 25601-80. Предел прочности на растяжение образца толщиной 2 мм составил $\sigma_B = 800$ МПа.

При растяжении образца из МПКМ сохранились монолитность слоистой конструкции материала и совместная работа слоя металла и углепластика вплоть до разрушения. Предельная деформация при растяжении МПКМ зависит от деформации слоя МПК и составляет 1,2%, что значительно меньше, чем у Д16чАТ.

Результаты испытаний образцов приведены на рис. 4.

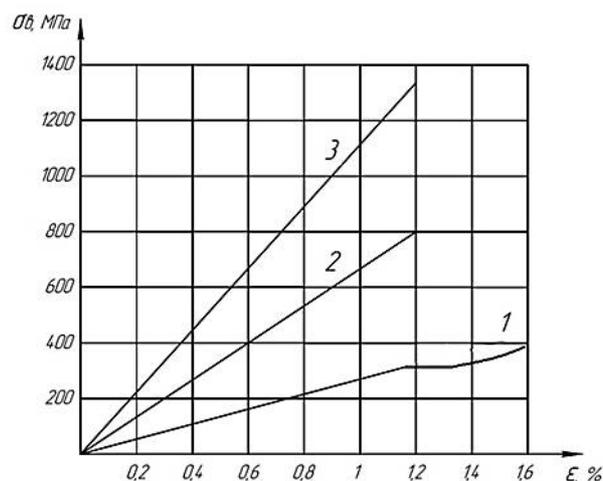


Рис. 4. 1 - Зависимость σ - ϵ - Д16чАТ, 2 - ПКМ, 3 - МПКМ

Зависимость σ - ϵ МПКМ показывает, что получена обшивка с радиусом кривизны 1500 с более высокими прочностными характеристиками, чем Д16чАТ.

Рассмотрим изменение весовых характеристик обшивки из МПКМ.

Таблица 3

материал	толщина, мм	ширина, мм	длина, мм	вес, кг
Д16чАТ	4	600	1500	9,7
Д16чАТ	2	600	1500	4,8
МПКМ	4	600	1500	7,7
ПКМ	2	600	1500	2,9

Из табл. 3 следует, что выигрыш в весе обшивки, изготовленной из МПКМ, составляет более 20%.

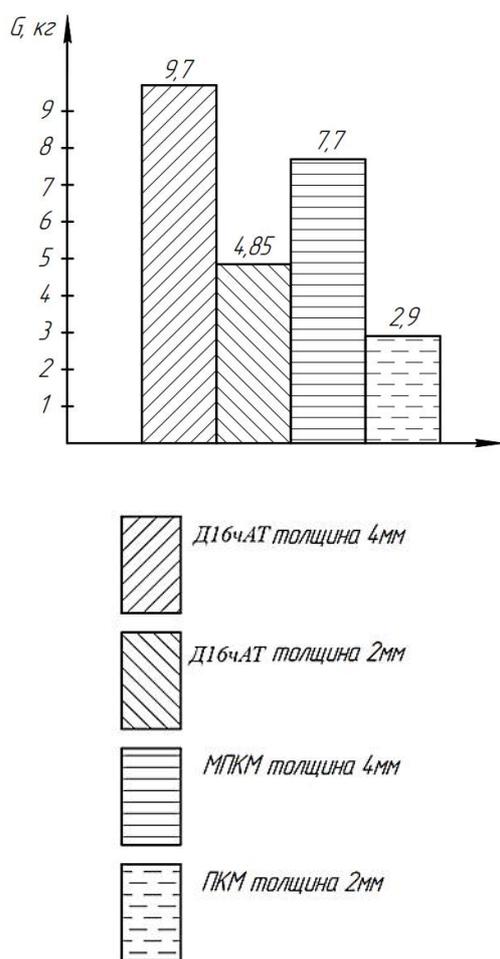


Рис. 5

Проведённые исследования показывают, что применение МПКМ в конструкции приведённых деталей представляют возможность реализации технологического прогресса, учитывая, что полная замена

металла на композиты является сложной технической и экономической проблемой.

Заключение

1. Разработан технологический процесс изготовления обшивки из МПКМ, включающий процесс обтяжки металлической заготовки, являющейся поверхностью для выкладки ПКМ и соединённой с обтяжным пуансоном для последующего термостатирования.

2. Разработан способ обтяжки, позволяющий уменьшить трение между заготовкой и пуансоном, обеспечить выравнивание деформации на поверхности заготовки и повысить точность получаемой обшивки.

3. Разработана технология изготовления МПКМ, обеспечивающая повышение прочности и снижение веса обшивки более чем на 20%.

Литература

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение итоги и перспективы // Вестник России академии наук 2002. №1. С. 3-12.
2. Гуляев Г.М., Железина Г.Ф., Ильченко Е.И. Слоистые металлополимерные композиты на основе алюминиевых и титановых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2002. №51. С. 50-58.
3. Акмеев Н.Р., Гуляев И.Н. Исследование механического поведения металлокомпозита с адаптивной схемой армирования// Авиационные материалы и технологии. 2017. № 3 (48). С. 43-49.
4. Одинг С.С., Молод М.В. Повышение технологических возможностей процесса обтяжки обшивок на прессах с ЧПУ// Аэродинамика, механика и технология авиастроения: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2000. С. 11-15.
5. Пат. №2459680 РФ. Способ обтяжки листовых материалов /Максименков В.И., Молод М.В. и др.; 27.08.2012; Заявитель ВГТУ.
6. Максименков В.И. Определение параметров трения при обтяжке оболочек: монография. Воронеж: ВГТУ, 1993. 44с.
7. Максименков В.И., Одинг С.С., Молод М.В. Определение параметров трения при формообразовании оболочек: монография. Воронеж: ВГТУ, 2015. 81с.

Поступила 17.10.2022; принята к публикации 16.12.2022

Информация об авторах

Максименков Владимир Иванович - д-р техн. наук, профессор кафедры самолётостроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д.84), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Молод Марина Владиславовна - д-р техн. наук, доцент кафедры самолётостроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д.84), e-mail: molodmv@yandex.ru
Гребенников Дмитрий Сергеевич - ведущий инженер, ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, д.27), e-mail: dmitry280294@gmail.com

IMPROVING THE QUALITY OF MANUFACTURING PARTS FROM METAL-POLYMER COMPOSITE MATERIALS

V.I. Maksimenkov¹, M.V. Molod¹, D.S. Grebennikov²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh Joint-Stock Aircraft Building Company, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the use of composite materials in domestic and foreign aircrafts. We show their advantages, providing solutions to issues of weight reduction and increasing the strength of parts, assemblies, aggregates and the whole product. At the same time, we note disadvantages associated with low impact resistance, which reduces the effectiveness of their use in highly loaded airframe zones. One of the ways to solve this issue is the use of metal-polymer composite materials (MPCM) in structures. We formulated the purpose and objectives of the study and gave manufacturing options of MPCM, which is a combination of aluminum blanks and PCM. Considering that the PCM has a low plasticity-1-2%, we considered the process of separate deformation of aluminum sheet and PCM. The shaping of the aluminum sheet was carried out by the method of skinning. The applied tight punch was made of aluminum alloy by casting, which, after processing, ensured the process of forming the sheet to a given curvature, followed by its use for laying out and temperature control in an autoclave. One of the important tasks to be solved is to ensure uniformity of deformations and ensure stable properties in the resulting workpiece during fitting. This is achieved by reducing friction on the surface of the punch using the solution given in Patent No. 2459680. We analyzed the formation of samples from PCM and developed the technological process of manufacturing parts from MPCM, which includes all stages from obtaining the workpiece, to the process of fitting, subsequent laying out, temperature control and control of the finished part. Here we present the results of tensile testing of samples from MPCM – aluminum – D16CHAT, from PCM and MPCM, which tested the strength and plastic characteristics of the tested materials. We carried out a weight calculation of the components of the MPCM, which revealed the weight efficiency of the developed MPCM design compared to SD16CHAT. We revealed an increase in the strength of the MPCM cladding and a weight reduction of more than 20%. The use of this MPCM manufacturing technology allows us to ensure an increase in the quality of the parts obtained with the required accuracy.

Key words: Punch, MPKM sheathing, friction, carbon fiber, CNC equipment.

References

1. Kablov E.N. “Aviation materials science results and prospects”, *Bulletin of Russian Academy of Sciences (Vestnik Rossiyskoy akademii nauk)*, 2002, no. 1, pp. 3-12.
2. Gunyaev G.M., Zhelezina G.F., Il'chenko E.I. “Layered metal-polymer composites based on aluminum and titanium alloys”, *Aviation Materials and Technologies (Aviatsionnye materialy i tekhnologi)*, 2002, no. 51, pp. 50-58.
3. Akmееv N.R., Gulyaev I.N. “Study of the mechanical behavior of a metal composite with an adaptive reinforcement scheme”, *Aviation Materials and Technologies (Aviatsionnye materialy i tekhnologi)*, 2017, no. 3(48), pp. 43-49.
4. Oding S.S., Molod M.V. “Improving the technological capabilities of the process of sheathing on CNC presses”, *Coll. of Scientific Papers: Aerodynamics, Mechanics and Technology of Aircraft Construction (Aerodinamika, mekhanika i tekhnologiya aviastroeniya)*, VSTU, 2000, pp. 11-15.
5. Maksimenkov V.I., Molod M.V. et al. “Method of tightening sheet materials” (“Sposob obtyazhki listovykh materialov”), patent of RF no. 2459680, dated 08/27/2012, applicant VSTU.
6. Maksimenkov V.I. “Determination of the friction parameters in the covering of shells” (“Opredelenie parametrov treniya pri obtyazhke obolochek”), monograph, 1993, 44 p.
7. Maksimenkov V.I., Oding S.S., Molod M.V. “Determination of friction parameters during shell shaping” (“Opredelenie parametrov treniya pri formoobrazovanii obolochek”), monograph, 2015, 81 p.

Submitted 17.10.2022; revised 16.12.2022

Information about the authors

Vladimir I. Maksimenkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Marina V. Molod, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: molodmv@yandex.ru

Dmitriy S. Grebennikov, Leading Engineer, Voronezh Aircraft Building Company (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: dmitry280294@gmail.com

О ВОЗДЕЙСТВИИ ПОВЕРХНОСТНОГО ОКИСЛЕНИЯ ПРИ ОТЖИГЕ НА ПЛАСТИЧНОСТЬ ПО ЭРИКСЕНУ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛИСТОВЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А.Б. Коломенский^{1,2}, С.В. Шахов², Р.Т. Мустафин², Б.А. Коломенский²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Филиал ПАО «Ил» - ВАСО, г. Воронеж

Аннотация: известно, что при изготовлении титановых сварных конструкций применяют отжиг для снижения остаточных напряжений, выполняемый, как правило, в воздушной среде. Нагрев при температурах свыше 300 °С сопровождается появлением интерференционно-окрашенных оксидных плёнок, а при температурах более 550-600 °С - газонасыщенных слоёв, влияние которых на механические характеристики не исследовано в достаточной мере. Исследовано влияние оксидных плёнок, формирующихся в процессе отжига, на пластичность по Эриксену основного металла и сварных соединений из листовых титановых сплавов. Работы проводили как на основном металле, так и на сварных заготовках титановых сплавов ВТ1-0, ПТ7М и ВТ6ч, получивших широкое распространение при изготовлении летательных аппаратов. Часть листовых заготовок имела газонасыщенный подслоя. Установлено, что оксидные плёнки, формирующиеся в процессе отжига при температурах до 550 °С незначительно (не более чем на 7%), понижают пластичность по Эриксену низкопрочных титановых сплавов и могут оказывать положительное влияние на технологическую пластичность высокопрочного титанового сплава. Наличие газонасыщенного подслоя при этом может повышать пластичность как основного металла, так и сварных соединений данных сплавов

Ключевые слова: титановые сплавы, сварка, отжиг, оксидные плёнки, пластичность по Эриксену

Введение

В процессе производства титановые листовые сварные конструкции подвергаются промежуточному и финишному отжигу с целью снижения напряжений, а также операциям правки и формообразования [1]. В процессе нагрева на поверхности деталей формируются оксидные плёнки, влияние которых на механические характеристики, в частности, на технологическую пластичность в литературных источниках до конца не исследовано.

Постановка задачи

Задачей работы было исследование воздействия оксидных плёнок на пластичность в условиях двухосного напряжённого состояния листовых сварных соединений из титановых сплавов.

Материалы и методы исследования

В работе изготавливали листовые образцы как из основного металла, так и сварные толщиной 0,8 мм габаритами 70 x 300 мм из листов технического титана ВТ1-0 и сплавов

ПТ7М и ВТ6ч, широко распространённые в самолётостроении.

Испытания по Эриксену с установлением параметра вытяжки до появления трещины выполняли на установке МТЛ-10Г-1 с диаметром матрицы 27 и шарика 20 мм соответственно.

Предварительно образцы подвергали воздушному отжигу: для титана ВТ1-0 - 800° С, 2ч.; для сплавов ПТ7М и ВТ6ч - 850° С, 1ч. При этом в листах полностью снимается нагартовка и исключается её влияние на результаты испытаний, и одновременно формируется газонасыщенный слой ~ 100 мкм.

Затем образцы подвергали пескоструйной обработке и травлению в кислотах HF и HNO₃ на регламентированную глубину: на 100 мкм (полный съём газонасыщенного слоя) и на 48, 60 и 70 мкм для сплавов ВТ1-0, ПТ7М и ВТ6ч соответственно. Оставшиеся при этом на поверхности газонасыщенные слои соответствовали перепадам микротвёрдости $\Delta HV \sim 20, 12$ и 5%, при которых ранее получали наиболее высокие значения повторно-статической долговечности [2].

В заключение проводили одночасовой финишный отжиг на воздухе при 350-650°С.

При $T \leq 450$ °С на поверхности формируются практически только оксидные плёнки; $T = 550$ °С соответствует началу заметного рас-

творения кислорода в титане (толщина газонасыщенного слоя < 2 мкм), а при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ наряду с оксидной плёнкой образуется фиксируемый методом микротвёрдости газонасыщенный слой глубиной ~8 мкм.

Результаты исследований

Вначале подвергали испытаниям образцы основного металла.

Из графиков на рис. 1-2 следует, что для сплавов пониженной прочности ВТ1-0 и ПТ7М отжиг при $T = 350\text{-}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ с повышением температуры в целом монотонно незначительно (не более чем на 5-7%) понижает пластичность основного металла. Это в равной мере касается и листов без газонасыщенного подслоя, и с подслоем. При этом, однако, следует отметить, что для титана ВТ1-0 наличие газонасыщенного подслоя на 3-7% повышает показатель пластичности, а для сплава ПТ7М – практически не оказывает воздействия.

Для сплава более высокой прочности ВТ6ч зависимость $H = f(T)$ заметно отличается (см. рис. 3). Для металла с полностью удалённым слоем отжиг при температурах $350\text{-}550\text{ }^{\circ}\text{C}$ на ~7-10% повышает значения H ; при частичном сохранении газонасыщенного слоя пластичность практически не меняется в данном температурном диапазоне. Повышение скорости растворения кислорода в титане при $T=650\text{ }^{\circ}\text{C}$, видимо, является причиной ухудшения показателя пластичности на 10-12% как для варианта с подслоем, так и без него.

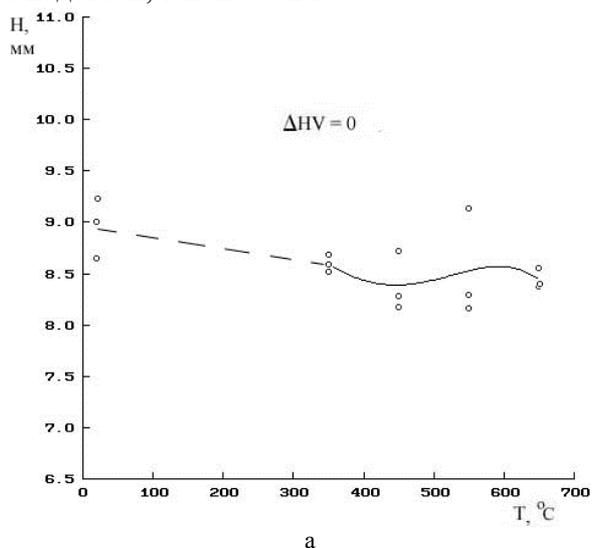
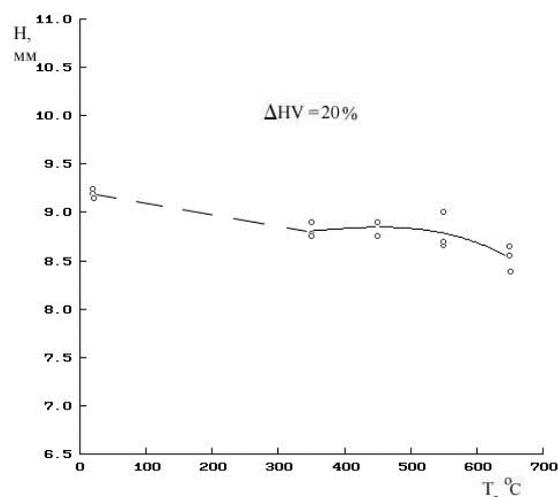
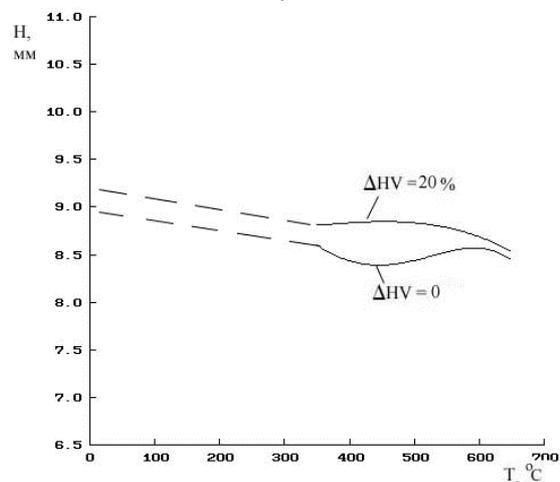


Рис. 1. Зависимость показателя пластичности (H) от температуры отжига основного металла титана ВТ1-0: а – с полностью удалённым газонасыщенным слоем ($\Delta HV = 0$); б – с газонасыщенным подслоем ($\Delta HV = 20\%$) и в – сравнительное влияние наличия газонасыщенного подслоя на пластичность по Эриксену

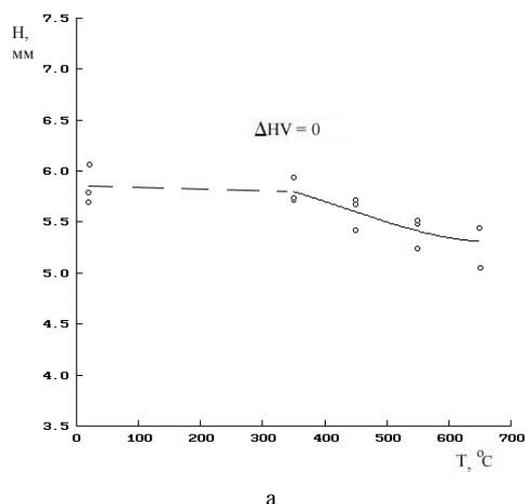


б



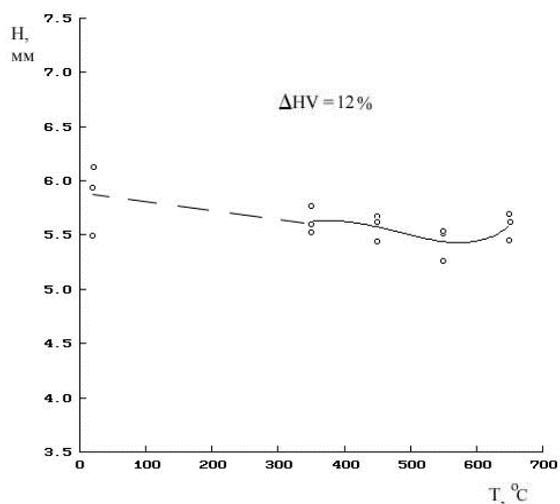
в

Рис. 1. Зависимость показателя пластичности (H) от температуры отжига основного металла титана ВТ1-0: а – с полностью удалённым газонасыщенным слоем ($\Delta HV = 0$); б – с газонасыщенным подслоем ($\Delta HV = 20\%$) и в – сравнительное влияние наличия газонасыщенного подслоя на пластичность по Эриксену (продолжение)

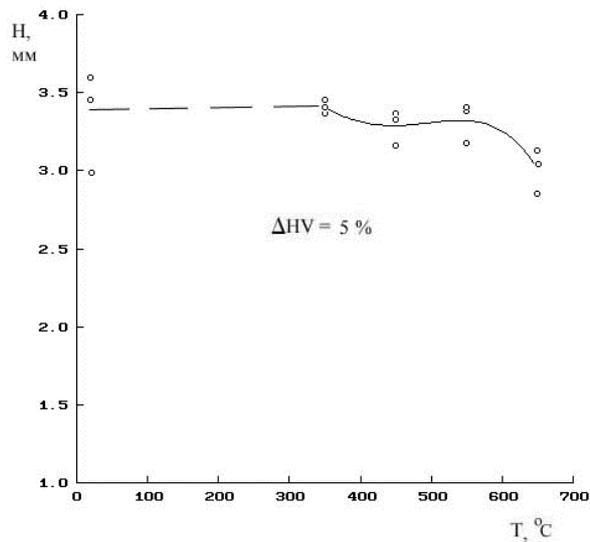


а

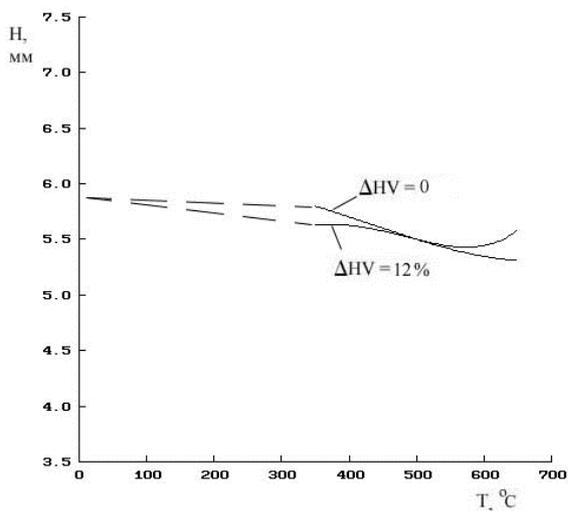
Рис. 2. То же, что на рис. 1, для сплава ПТ7М



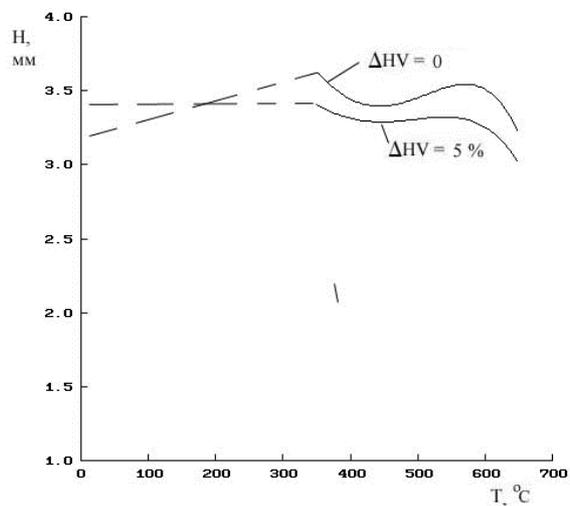
б



б



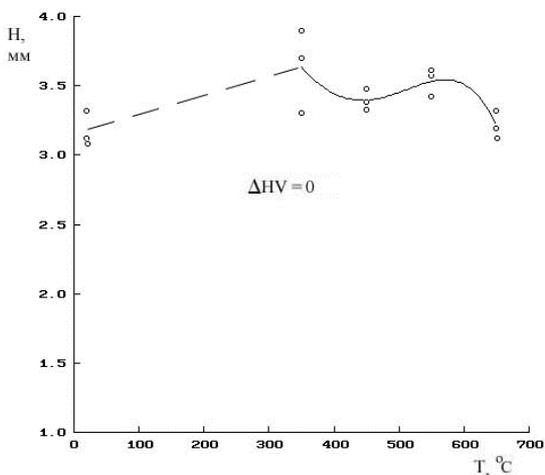
в



в

Рис. 2. То же, что на рис. 1, для сплава ПТ7М (продолжение)

Рис. 3. То же, что для рис. 1, для сплава ВТ64 (продолжение)



а

Рис. 3. То же, что для рис. 1, для сплава ВТ64

Кроме того, в настоящей работе проводили аналогичные исследования для сварных соединений титана ВТ1-0 и сплава ПТ7М, широко используемых для изготовления сварных трубопроводов.

Для имитации сварных швов выполняли проплавление листовых заготовок автоматической аргонодуговой сваркой с местной защитой (ААрДЭС) по режиму: $V_{св} = 6, 75$ мм/с; $I = 50$ А.

Учитывая, что в случае сварных соединений отжиг приводит не только к поверхностному окислению, но и к внутренним структурным изменениям, оценку влияния фактора окисления после финишного отжига на пластичность осуществляли с помощью сопоставления результатов, полученных для образцов с окислен-

ной поверхностью, и для образцов, прошедших облагораживающее травление на $\sim 5\text{--}8$ мкм.

Трещина во всех случаях образовывалась вначале в сварном шве.

Из полученных результатов следует, что удаление оксидных плёнок, образующихся при отжиге в диапазоне $T = 350\text{--}550$ °С, даёт для технического титана без газонасыщенного подслоя прирост параметра H примерно на 5-7% (см. рис. 4). То есть оксидная плёнка снижает пластичность сварных соединений технического титана. С ростом температуры отжига до 650 °С пластичность для обоих состояний поверхности становится одинаковой.

При наличии газонасыщенного подслоя (см. рис. 5) характерным является значительное положительное влияние наличия оксидной плёнки при 450°С: пластичность при этом больше на $\sim 10\%$, чем для варианта со стравленной плёнкой.

При сопоставлении данных рис. 4а и 5а можно видеть, что в присутствии газонасыщенного подслоя низкотемпературные (350...450 °С) оксидные плёнки на 10-12% повышают показатель пластичности в сравнении со случаем без подслоя.

Для сплава ПТ7М (рис. 6 и 7) можно в целом отметить, что при отсутствии газонасыщенного подслоя оксидные плёнки в изучаемом диапазоне температур отжига в целом положительно влияют на пластичность сварных соединений по Эриксену, а для варианта с газонасыщенным подслоем данное влияние не имеет однозначного характера.

Таким образом, по результатам исследований данной работы установлено, что наличие газонасыщенного подслоя с небольшими перепадами микротвёрдости ΔHV оказывает выраженное положительное влияние на показатели пластичности по Эриксену металла с оксидными плёнками. Это может быть объяснено уменьшением градиента твёрдости между оксидной плёнкой с нулевой пластичностью и пластичным металлом.

Выявленное положительное воздействие тонких оксидных плёнок не только на прочность, но и на пластичность высокопрочных титановых сплавов может объясняться залечиванием субмикротрещин плёнками при нарастании плотности дислокаций при деформировании металла [3, с.12].

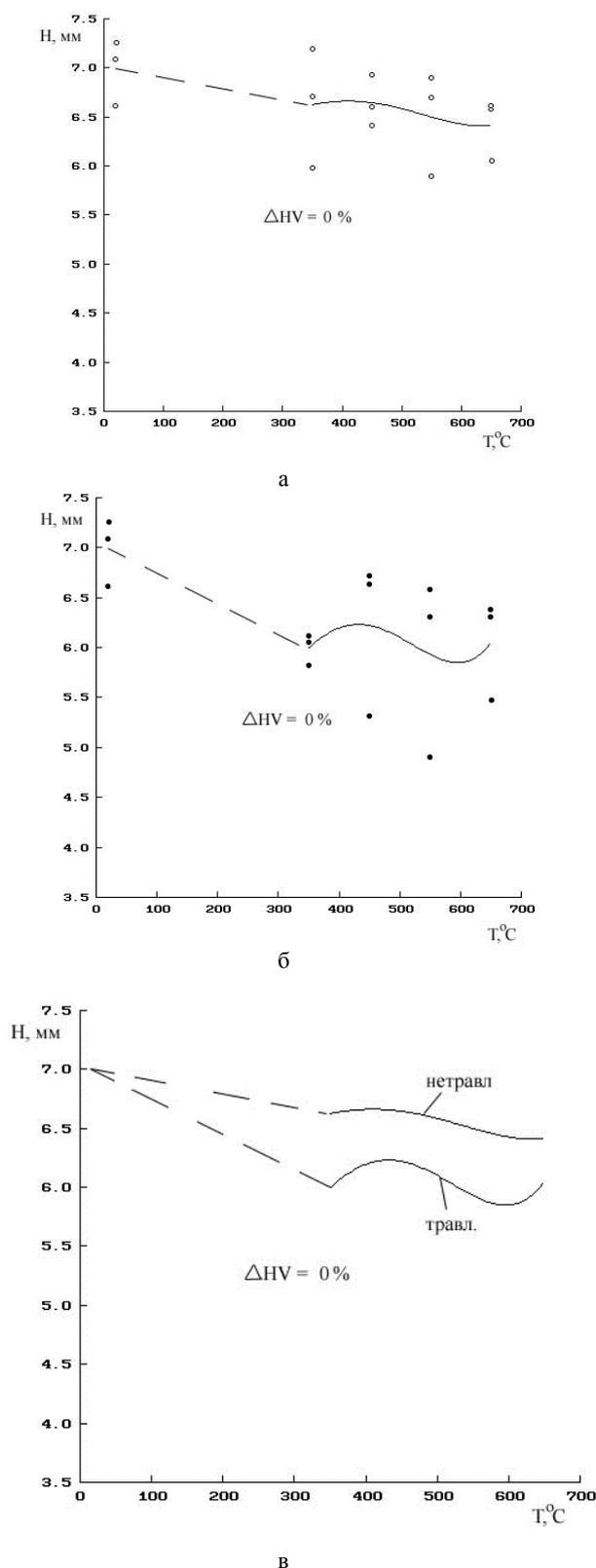
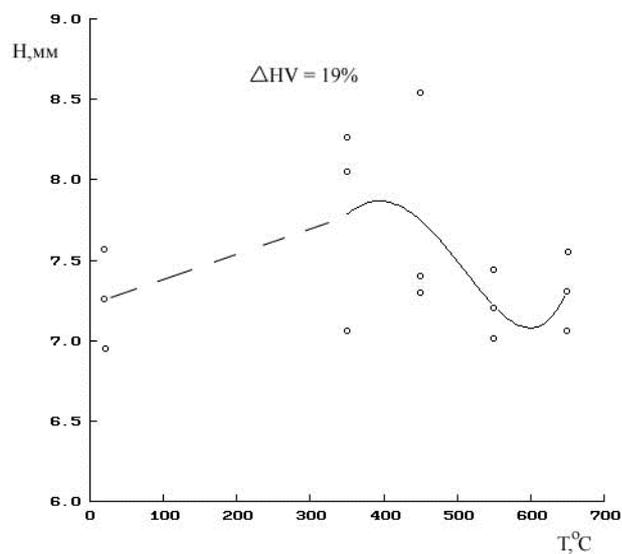
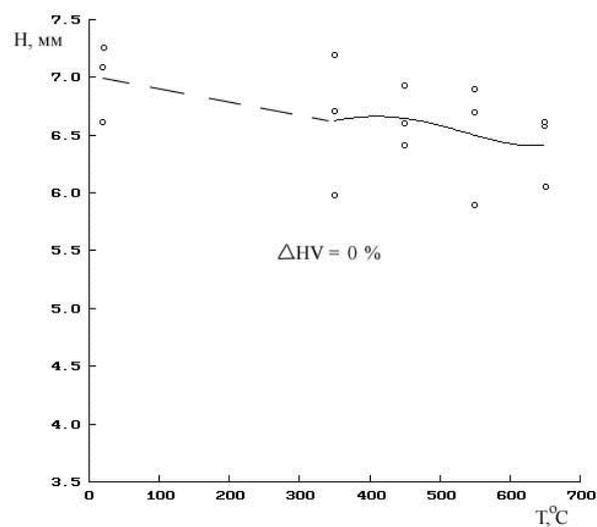


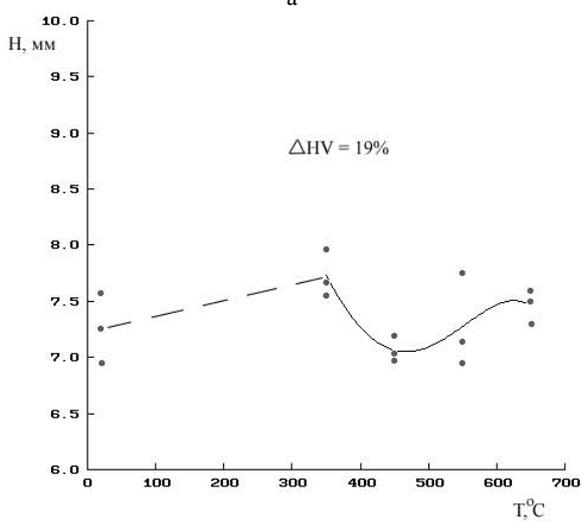
Рис. 4. Зависимость параметра (H) от температуры отжига технического титана VT1-0 без газонасыщенного подслоя ($\Delta HV = 0$): а – без травления после отжига; б - с травлением после отжига; в - сравнительное влияние травления после отжига на показатель пластичности



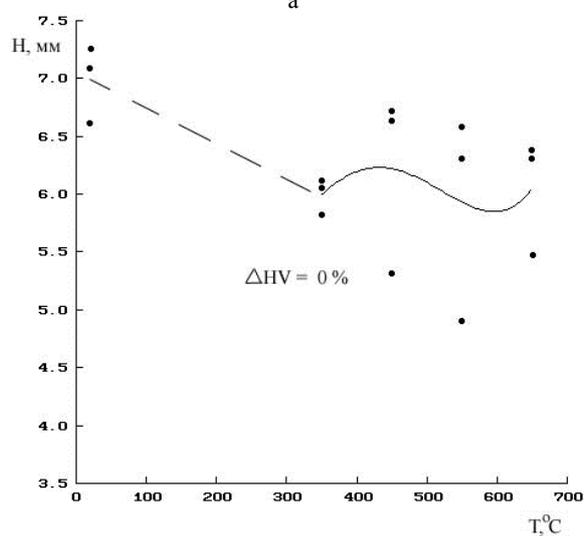
а



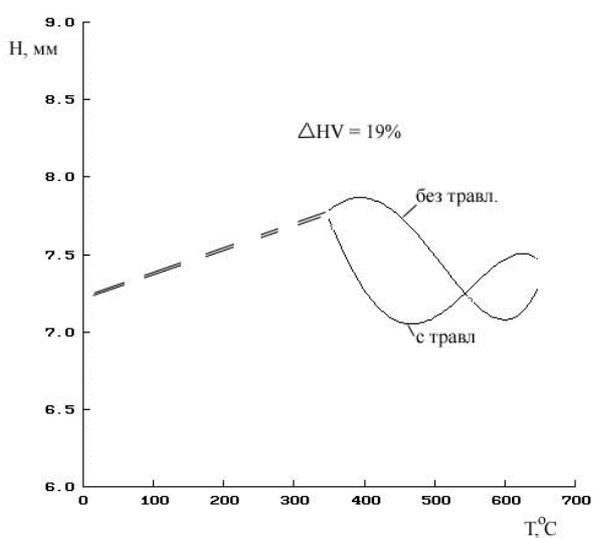
а



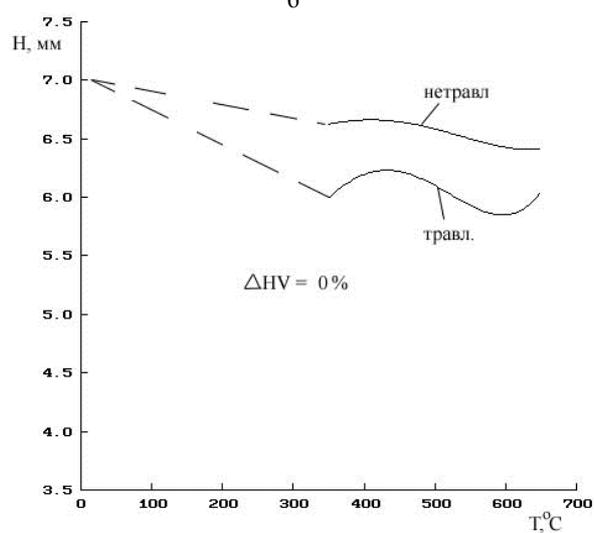
б



б



в



в

Рис. 5. То же, что на рис. 4, но с перепадом микротвёрдости $\Delta HV = 19\%$

Рис. 6. То же, что на рис. 4, для сплава ПТ7М

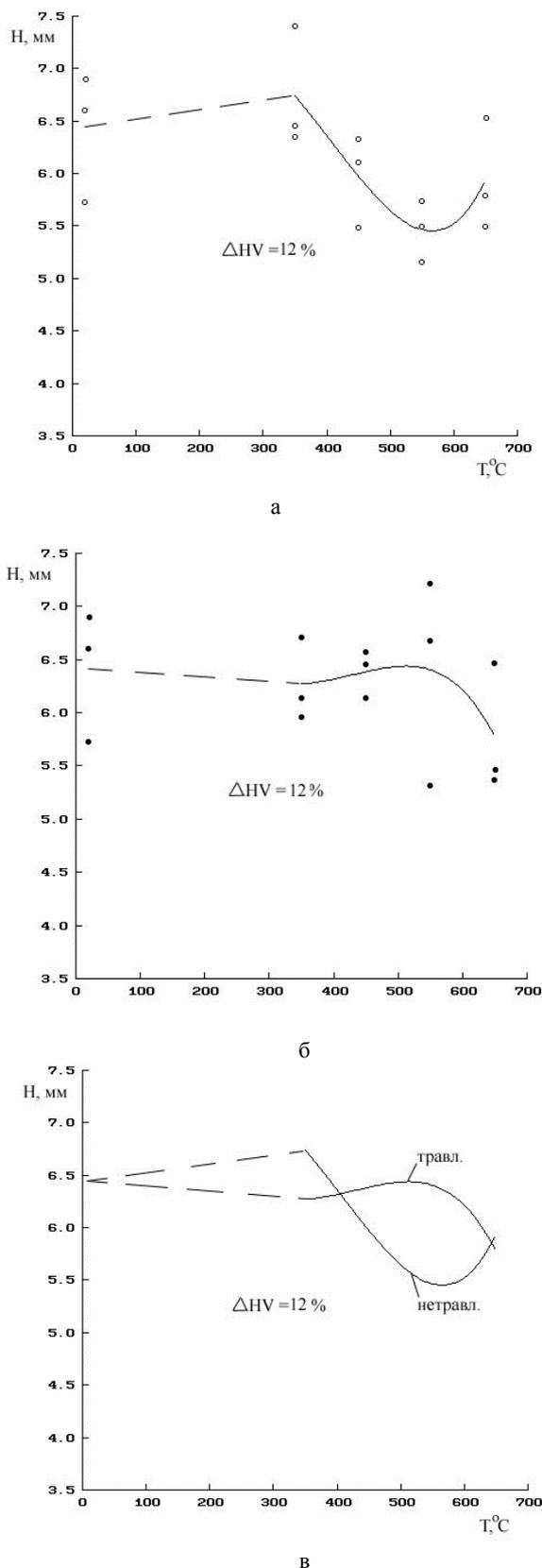


Рис. 7. То же, что на рис. 4, для сплава ТТ7М с перепадом микротвёрдости $\Delta HV = 12\%$

Выводы

1. Оксидные плёнки, образующиеся при отжиге с $T = 350-550\text{ }^{\circ}\text{C}$ незначительно (не более чем на 7%), снижают пластичность низкопрочных титановых сплавов ВТ1-0 и ПТ7М при вытяжке.

Для сплава повышенной прочности ВТ6ч выявлено положительное воздействие указанных оксидных плёнок на технологическую пластичность (на 7...10%), что может объясняться залечиванием субмикротрещин плёнками при деформировании металла.

2. Наличие регламентированного газонасыщенного слоя в присутствии оксидных плёнок повышает пластичность при вытяжке низкопрочного титана ВТ1-0 и снижает данный показатель для сплава повышенной прочности ВТ6ч.

3. Для сварных соединений титана ВТ1-0 после отжига оксидные плёнки при наличии газонасыщенного подслоя повышают пластичность, а без него – понижают.

Пластичность сварных соединений сплава ПТ7М в присутствии оксидных плёнок возрастает, что позволяет снять требование проведения обязательного травления после операции отжига.

Литература

1. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 368 с.
2. Коломенский А.Б., Шахов С.В., Коломенский Б.А. Сравнительное влияние различных газонасыщенных слоёв на механические характеристики листов из титановых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 6. С. 30-36.
3. Крамер И., Демер Л. Влияние среды на свойства металлов / под ред. Ю.А. Геллер. М.: Металлургия, 1964. 87 с.

Информация об авторах

Коломенский Александр Борисович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), главный металлург, Филиал ПАО «Ил» - ВАСО (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: metallurg@air.vrn.ru

Шахов Сергей Викторович – канд. техн. наук, начальник КБ, Филиал ПАО «Ил» - ВАСО (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: shahovsv@gmail.com

Мустафин Руслан Тимиргалеевич - технический директор, Филиал ПАО «Ил» - ВАСО (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: r-mustafin@air.vrn.ru

Коломенский Борис Александрович – канд. техн. наук, начальник службы рекламаций, Филиал ПАО «Ил» - ВАСО (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru

ON THE EFFECT OF SURFACE OXIDATION DURING ANNEALING ON THE ERIKSEN PLASTICITY OF WELDED JOINTS OF SHEET TITANIUM ALLOYS

A.B. Kolomenskiy^{1,2}, S.V. Shahov², R.T. Mustafin², B.A. Kolomenskiy²

¹**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

²**Branch of JSC "IL" - VASO, Voronezh, Russia**

Abstract: it is known that in the manufacture of titanium welded structures, annealing is used to reduce residual stresses, which is usually carried out in air. Heating at temperatures above 300 °C is accompanied by the appearance of interference-colored oxide films, and at temperatures above 550-600 °C - gas-saturated layers, the effect of which on the mechanical characteristics has not been sufficiently studied. The effect of oxide films formed during annealing on the Eriksen ductility of the base metal and welded joints from sheet titanium alloys was studied. The work was carried out both on the base metal and on welded billets of titanium alloys VT1-0, PT7M, and VT6ch, which are widely used in the manufacture of aircraft. Part of the sheet blanks had a gas-saturated sublayer. We established that oxide films formed during annealing at temperatures up to 550°C slightly (by no more than 7%) reduce the Eriksen ductility of low-strength titanium alloys and can have a positive effect on the technological ductility of a high-strength titanium alloy. The presence of a gas-saturated sublayer in this case can increase the ductility of both the base metal and welded joints of these alloys.

Key words: titanium alloys, welding, annealing, oxide films, plasticity according to Eriksen

References

1. Glazunov S.G., Moiseev V.N. "Structural titanite alloys" ("Konstruktsionnye titanovye splavy"), Moscow: Metallurgiya, 1974, 368 p.
2. Kolomenskiy A.B., Shahov S.V., Kolomenskiy B.A. "Comparative effect of various gas-saturated layers on mechanical characteristics of sheets from titanium alloys", *Metal Science and Heat Treatment of Metals (Metalovedenie i termicheskaya obrabotka metallov)*, 2016, no. 6, pp. 30-36.
3. Kramer I., Demer L., ed. Geller J.A. "Environment influence on metal properties" ("Vliyanie sredy na svoystva metallov"), Moscow: Metallurgiya, 1964, 87 p.

Submitted 10.09.2022; revised 16.12.2022

Information about the authors

Aleksandr B. Kolomenskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Chief Metallurgist, Branch JSC "IL" – VASO (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: metallurg@air.vrn.ru

Sergey V. Shakhov, Cand. Sc. (Technical), Chief of Branch JSC "IL" – VASO (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: shahovsv@gmail.com

Ruslan T. Mustafin, technical director, Branch JSC "IL" – VASO (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: r-mustafin@air.vrn.ru

Boris A. Kolomenskiy, Cand.Tech.Sci, Assistant Quality Director, Branch JSC "IL" – VASO (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: b-kolomenskiy@air.vrn.ru

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ СТАЛЬНЫХ КОРПУСНЫХ ОТЛИВОК ПОСРЕДСТВОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Л.С. Печенкина, М.С. Фролов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: анализируя опыт использования CAD-программ на примере применения СКМ ЛП LVMFlow, стало возможно утверждать то, что они безусловно решают проблемы по анализу причин брака отливок и оптимизации технологических процессов, поэтому данная тема является актуальной. Объектом исследования стала «корпусная» деталь массой 37 кг из низколегированной хромомолибденовой стали, входящая в весьма распространенный ассортимент многих отраслей промышленности. Может использоваться в неблагоприятных условиях при обширном диапазоне давлений и температур. Благодаря данным параметрам свое широкое применение она нашла в нефтегазовой сфере. Её эксплуатируют в роли запорной арматуры в нефтепроводе при работе под большим давлением при взаимодействии с SO_2 , что является неблагоприятными условиями для многих сталей. Существуют требования динамических знакопеременных нагрузок, параметрам которых наша деталь соответствует. Также предусмотрен ряд других требований соответствия по сопротивлению коррозии и герметичности. Вес корпуса с литниками составляет 168 кг. В данной детали наблюдается стабильный дефект - это усадочная пористость, которая обнаруживается при её изготовлении после механической обработки. Поэтому эта деталь была интересна для моделирования с помощью программного пакета LVMFlow. Научная новизна работы определяется оптимальным подбором критериев, влияющих на обеспечение плотной структуры в стальной отливке, подверженной большой усадке. Цель исследования – используя приложения CAD-программ Solidworks и LVMFlow в условиях песчаных форм с производственными технологическими показателями, обеспечивающими эффективную выплавку совершенной отливки, спроектировать модельно-опочную оснастку и усовершенствовать технологию изготовления детали "Корпус" из стали. Сокращение периода изготовления оснастки и выбор наилучшего варианта производства отливки, без лишних плавов – это преимущество перехода на сквозную разработку технологии и оснастки производства корпуса при литье в песчаные формы. Рассмотрены некоторые понятия, влияющие на дефект «Усадочная пористость» при литье в песчаные формы, а именно: питание затвердевающей отливки, направленность затвердевания, теплоаккумулирующая склонность форм и стержней, подача расплава в отливку. При рассмотрении данных понятий произвели оценку и выявили степень влияния на величину усадки

Ключевые слова: отливка, оснастка модельная, затвердевание, компьютерное моделирование, смесь формовочная, дефект, усадка

Введение

Самый используемый метод литья – это литье в песчаные одноразовые формы, около 80% от общемирового числа отливок. Рассматриваемая номенклатура деталей, конструкция которых состоит из тонких и толстых стенок, характеризуется высоким присутствием усадочных дефектов, самые явные из них – это рыхлость и пористость. Для устранения литейных дефектов требуется расчет оценки факторов, влияющих на их образование. Чтобы не останавливать изготовление деталей, требуется незамедлительно обнаружить факторы формирования недочётов литья и применить нужные научно-технические достижения [1, 2].

Новейший метод модернизации технологического процесса изготовления отливок с

высокими допусками качества построен на активном применении цифровой электроники и технологий, поэтому данная тема является актуальной [3].

Проанализировав практическое применение программ CAD и, в частности, СКМ LP LVMFlow, можно утверждать, что они успешно применяются для решения задач, связанных с анализом причин дефектов литья и оптимизацией технологических процессов [4,5].

В качестве объекта исследования была выбрана деталь «корпус» из низколегированной хромомолибденовой стали массой 37 кг, которая является достаточно распространенным ассортиментом во многих отраслях промышленности, таких как предназначенные для нефтегазовых установок и комплексов, часть нефтепровода. Такие детали характерны для использования в агрессивных средах, используются при взаимодействии с SO_2 под большим давлением. Применяются в качестве запорной арматуры в нефтепроводе и соответ-

ствуют стандартам динамических знакопеременных нагрузок, в широком диапазоне температур, давлений и агрессивных сред. Данной детали необходимо обладать высокой степенью защиты от коррозии, а также удовлетворять условиям по герметичности. Масса корпуса с литниками 168 кг. При её изготовлении после механической обработки обнаруживаются дефекты в виде усадочной пористости. Выбранная предприятием технология изготовления, основанная на методе литья в разовые формы, не может произвести детали без изъяна. Поэтому эта деталь представляет интерес для моделирования с помощью пакета программ LVMFlow.

Научная новизна работы состоит в подборе критериев, влияющих на обеспечение оптимально плотной структуры в стальной отливке, подверженной высокой усадке.

Цель исследования – используя приложения CAD-программ Solidworks и LVMFlow в условиях песчаных форм с производственными технологическими показателями, обеспечивающими эффективную выплавку совершенной отливки, спроектировать модельно-опочную оснастку и усовершенствовать технологию изготовления детали "Корпус" из стали.

Методика проведения эксперимента

Для работы в СКМ LVMFlow поначалу строятся 3D-модели детали со всевозможными конструкциями ЛПС, которые потом изменяются в нужное разрешение STL. Для построения 3D-моделей используем программу 3D-моделирования SolidWorks 2014. Сперва нужно создать 3D-модель основной части отливки по эскизу. Требуемым движением создаем модуль эскиза и по размерам, которые у нас есть, создаем необходимую деталь, рис. 1. После подготовки данной модели переходим к формированию трехмерной модели макета, для чего используем функцию «повернутая бо-бышка», определяя сторону выдавливания и величину толщины. Таким образом построим трехмерную модель части отливки в центре.

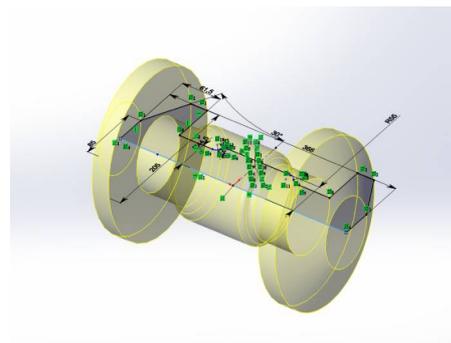


Рис. 1. Трехмерная модель части отливки в центре

Далее по подобию создаем остальные части отливки. Отверстия и полости получим, воспользовавшись функцией «вытянутый вырез». Соответственно, изначально создаем макет, после в функции «вытянутый вырез» делаем выбор направления и длины выреза.

После данных манипуляций мы получили 3D модель отливки. Теперь необходимо смоделировать отливки с ЛПС, таким действием мы получим необходимые для исследования варианты. После построений получаем монолитное твердое тело, которое и требуется для реализации цели нашего исследования. Основное условие - монолитность тела, в противном случае результаты нашего исследования могут получиться недостоверными или вообще провалиться.

Ниже представлены различные конструкции отливок ЛПС, для всех экспериментов, которые будут проводиться. Набор 3D моделей приведен на рис. 2 – 4.

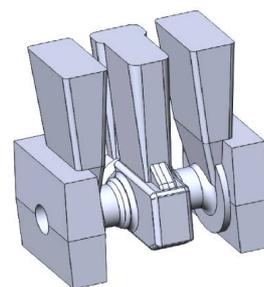


Рис. 2. Конструкция отливки по базовому варианту

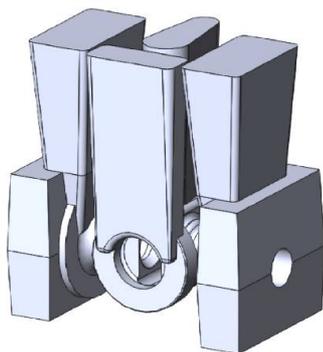


Рис. 3. Конструкция отливки со смещенными прибылями

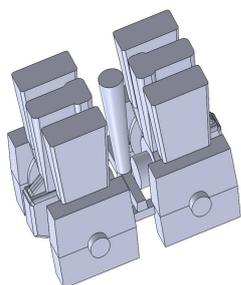


Рис. 4. 3D модель для двух отливок в форме

Проведение исследования

Выбор технологии получения отливки состоит из таких этапов:

- загрузка трехмерной модели в LVMFlow, введение стержней и утеплителей, других элементов литейных форм;
- разбивка отливки на элементарные объемы, отметка сплава, материалов форм, установка температур;
- проведение моделирования.

Модуль «Просмотр» обеспечивает наглядность моделирования в виде снимков с экрана.

Для начала загрузим тела файла CAD в формате STL, это выходит в модуль 3DImport. На данном этапе не обращаем внимания на направленность отливки, она может быть ошибочной. Поправляем положение отливки на экране компьютера, оно должно совпасть с её расположением во время заливки, а направление Z должно совпасть с направлением силы тяжести. Требуется придерживаться размерности координат 45°. Во избежание смещения корпуса требуется зафиксировать его. Сейчас необходимо трансформировать приобретённую модель в формат FLT, необходимый для дальнейшей работы (рис. 5).

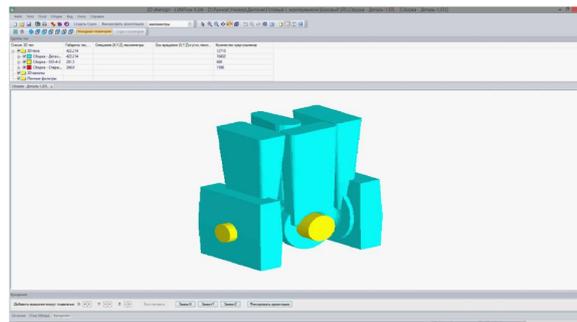


Рис. 5. Отливка в модуле «3DImport»

Сохранив промежуточный результат, возвращаемся в «Начальные установки» и определяем параметры моделирования. Выбрав величину сетки разбиения (рис. 6), проводим дальнейший расчет. Изменяя эту величину, можно наблюдать изменение числа всех ячеек и объема оперативной памяти, необходимой для реализации исследования.

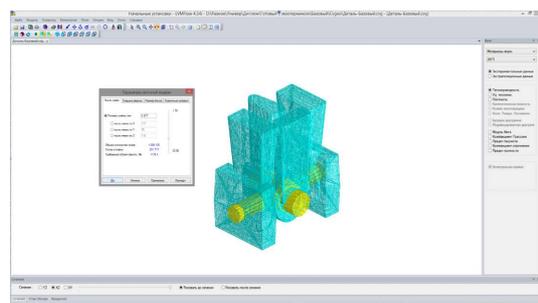


Рис. 6. Задание размеров ячеек

Используем модуль «Затвердевание» для основного расчета при моделировании. Результаты исследования представляются в 3D, 2D - сечении, изометрии, в жидкой фазе, усадке, микропористости, температурных режимах.

Вначале проведем расчет для базового варианта технологии изготовления отливки, а затем по полученным результатам будем вести поиск оптимальных с точки зрения дефектообразования вариантов.

При моделировании процессов затвердевания отливок определялись последующие первоначальные требования: температура разливки жидкой стали составила 1580°C; в качестве формовочного материала бралась в работу ПСС смесь с жидким стеклом при 20°C, ячейка в 5 мм, время разливки стали - 12 с.

Итоги прогнозирования в соотношении с основной технологией продемонстрированы на рис. 7 - 9.

В отливке наблюдаются закрытые усадочные раковины и микропористость.

Рассмотрим факторы, влияющие на создание дефектов.

Усадочный дефект в виде полости расположен сверху стержня (рис. 7), в подприбыльной части отливки. Как было сказано выше, деталь работает в контакте с SO_2 при повышенном давлении. Наличие дефекта приведет к малому сроку службы детали. Появление таких дефектов, как правило, происходит из-за нарушения питания жидким металлом при затвердевании термического узла отливки, в результате чего сплав затвердевает без компенсации усадки.

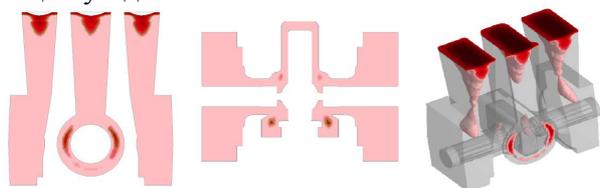


Рис. 7. Распределение усадки в теле отливки

Данные о процессе затвердевания, полученные из изучения кривых охлаждения для различных точек, подтверждаются и результатами моделирования, продемонстрированными на рис. 8, на котором показаны последовательные периоды затвердевания отливки, демонстрирующие взаимозависимость числа жидкой фазы от времени, показывающие понятное понимание о механизме затвердевания сплава с момента заливки до полного отверждения. В первую очередь затвердевают литники, на второй минуте после заливки и на четвертой минуте – шлакоуловитель, на пятой минуте затвердевает центральная часть отливки между двумя термическими узлами, на десятой минуте видно, как в месте контакта меньшей прибыли и отливки жидкая фаза полностью переходит в твердую и перекрывает доступ жидкому сплаву из прибыли в отливку, вследствие формируется закрытая усадочная раковина. Данный дефект образовывается, вероятно, из-за вышеперечисленных причин.

Усадка является одним из условий образования микропористости. Произведем анализ микропористости с помощью критерия Нияма. На рис. 9 показано перераспределение микропористости в условиях производственной технологии. Значения критерия Нияма в конкретных областях соответствует 0,006. Для плотных стальных отливок величина 0,86 и более является нормой. Делая выводы, мы можем утверждать, что к образованию усадочной по-

ристости привело нарушение питания отливки жидким сплавом.

Подводя итог, установлено, что быстрое охлаждение сплава в прибыли является одним из условий образования усадочных дефектов в отливке, то есть нарушенный принцип направленной кристаллизации из-за несоблюдения питания отливки. Который из факторов играет первоочередную роль, нам позволит ответить дальнейшее исследование посредством СКМ LVMFlow.

В месте контакта меньшей прибыли и отливки жидкий металл полностью переходит в твердую фазу и перекрывает питание отливки жидким металлом из прибыли, вследствие чего образуется замкнутая усадочная раковина. Это и есть вероятная причина образования данного дефекта.

Теплоаккумулирующая способность - это способность материала удерживать тепло, которая зависит от удельной теплоемкости материала, его плотности и теплопроводности.

Теплоаккумуляция формы влияет на величину пористости в отливке. С увеличением теплоаккумуляции литейной формы величина грани микропористости снижается до определенных параметров, из-за этого сталкиваемся с проблемой дальнейшего уменьшения данной длины грани. Чтобы уменьшить образование пористости, используем смеси с конкретной величиной теплоаккумулирующей способности. Но по итогу совсем убрать образование пористости не получится.

Пытались поднять температуру литейной формы для получения наиболее высокого результата отказа отливки от микропористости.

При повышении температуры формы пористость оказалась выше. Таким образом, заливка сплава в литейные формы сразу после сушки в горячем виде повышает дефекты по микропористости.

Разнообразность распределения микроусадочных раковин по её сечению становится больше из-за наибольшего ускорения отвода тепла от закристаллизовавшейся отливки и у них появляется свойство сосредоточения в осевой зоне. Добавка маршалита в смесь для изготовления форм, применение хромомagneзита и других теплопроводных смесей определенно понижает микропористость и ведет к разрастанию усадочной полости в центральной части.

В настоящее время большое внимание уделяется смесям, химически твердеющим.

При связывании ХТС берут в работу карбамидные, карбамиднофурановые, фенолфурановые смолы и катализатор, благодаря которым полученная смесь становится прочнее. В качестве катализаторов выступают органические или неорганические кислоты, такие как бензосульфокислота, ортофосфорная кислота или азотная кислота. С целью увеличения технологических свойств добавляется окись железа, древесная мука. ХТС обладает повышенной прочностью, газопроницаемостью, податливо-

стью и выбиваемостью. Жидкостеклянная смесь ей будет уступать в теплоизоляции. Это также влияет на время затвердевания отливки, оно значительно увеличивается. В результате жидкий расплав в прибыли содержится дольше, позволив кристаллизироваться отливке, уменьшив величину усадки.

На рис. 10 показано распределение усадки в теле отливки в случае применения химически твердеющей смеси.

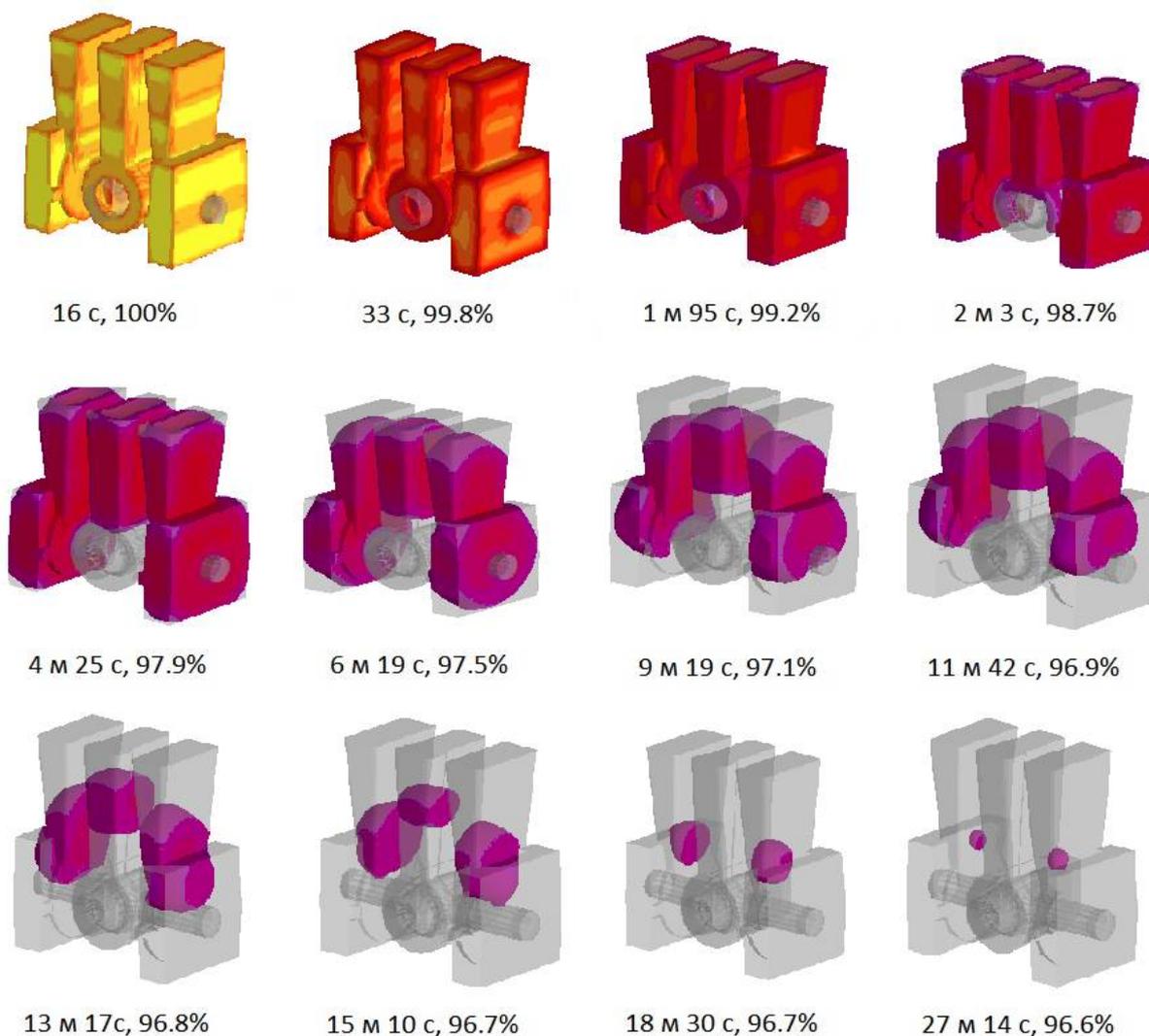


Рис. 8. Затвердевание отливки по этапам, с представлением времени затвердевания и процента жидкой фазы

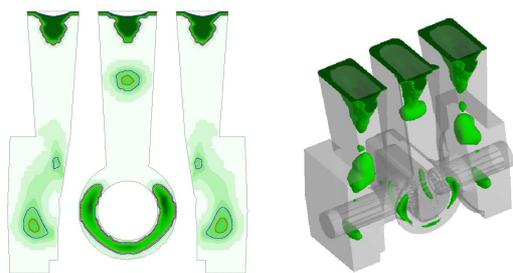


Рис. 9. Распределение микропористости в отливке

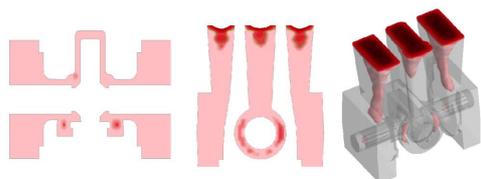


Рис. 10. Распределение усадки в теле отливки при замене смеси

Проведенный анализ результатов моделирования может быть представлен в графическом изображении, рис. 11, 12.

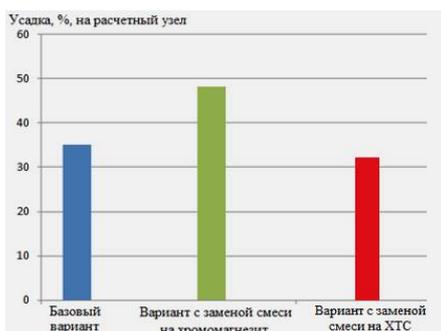


Рис. 11. Сравнение полученных результатов по величине усадки

Из полученных результатов, рис. 11, можно сделать вывод о незначительном уменьшении усадки в подприбыльной области до 33 % (по базовому варианту усадка достигла 35%) в случае использования XTC.

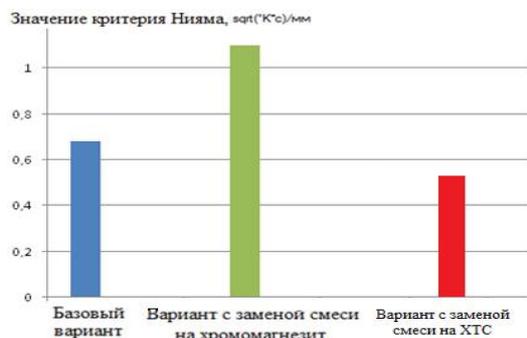


Рис. 12. Сравнение полученных результатов по величине микропористости

Из рис. 12 отчетливо видно небольшое увеличение микропористости при замене смеси на XTC, это произошло из-за пониженной теплопроводности XTC по сравнению со смесью жидкого стекла. Критерий Ниямы при использовании XTC достигает 0,55, тогда как при первоначальном варианте его значение равнялось 0,65, а при использовании хромомагнетитовой смеси микропористость полностью отсутствовала, но была большая усадка на расчетный узел (48%, согласно рис. 11).

Таким образом, изменяя состав смеси, можно влиять на изменение усадки и микропористости в небольших пределах, однако нельзя полностью избавиться от дефектов.

Заключение

Как видно из вышепредставленных результатов исследований, замена формовочных смесей при базовом варианте технологии не даёт возможности полностью избавиться от усадочных дефектов в отливке, возможно только снизить их концентрацию и лишь объем и расположение в отливке. Сделаем выводы, на основе наших полученных данных в процессе исследования:

1) Выявили положительный аспект при работе с методом сквозного проектирования технологии и оснастки для получения нашей детали в разовые формы – это сокращение времени производства модельной оснастки и подбора эффективного способа получения литой заготовки, без натурального эксперимента.

2) Выявили факторы, наиболее весомые для получения плотной структуры в литой детали «Корпус» - направленность затвердевания, созданная конструкцией прибылей, теплоаккумулирующая способность литейной формы, подвод сплава.

3) Анализ заводского и проектируемого вариантов показал, что время всех стадий технологического цикла, а главное, подбора оптимального технологического процесса уменьшилось.

4) Снижение трудоемкости труда.

В результате, основываясь на изложенном выше, для получения бездефектной отливки «Корпус» в процессе ее изготовления литьем в песчаные формы следует пользоваться следующими рекомендациями:

- марка сплава – 35ХМЛ;
- температура заливки металла – 1580 °С;
- высота заливки расплава – 60 мм;
- время заливки формы – 16 с;

- расположение отливки в форме – горизонтальное;
- материал формы – облицовочная хромомagneзитовая смесь;
- начальная температура формы – 20 °С;
- материал стержня – холоднотвердеющая смесь;
- применение измененного вида прибылей.

Литература

1. Печенкина Л.С. Моделирование процесса формирования усадочных дефектов в отливках// Информационные системы и технологии: достижения и перспективы: тр. междунар. науч.-техн. конф. Азербайджан: Сумгаитский государственный университет, 2020. С. 103-105.

2. The effectiveness of the use of information technologies/ О. Popova, L. Pechenkina, A. Pechenkin, M. Popova, V. Petrenko, A. Demidov // IOP CONF. SER. Mater Science. Kazan, Russia, 2020. p. 012201

3. Веретенник А.А., Печенкина Л.С. Анализ условий получения отливки «Подкладка с упором» в разовые песчаные формы с помощью компьютерного моделирования // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж: ФГБОУ ВО ВГТУ, 2017. С. 14-16.

4. Щегинин А.В., Печенкина Л.С., Сушко Т.И. Исследование процесса охлаждения чугуновых отливок в форме // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Энергетика. 2004. Вып. 7.4. С. 50-53

5. Прокопенко К.А., Печенкина Л.С. Моделирование затвердевания корпусных отливок// АКТ-2020: тр. междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ООО Фирма «Элист», 2020. С. 148-149.

Поступила 29.10.2022; принята к публикации 16.12.2022

Информация об авторах

Печенкина Лариса Степановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pls-7@mail.ru

Фролов Михаил Сергеевич – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: mikhail_fr2001@mail.ru

SELECTION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS FOR OBTAINING HIGH-QUALITY STEEL BODY CASTINGS BY COMPUTER MODELING

L.S. Pechenkina, M.S. Frolov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: analyzing the experience of using CAD programs on the example of using SKM LP LVMFlow, it became possible to assert that they certainly solve problems in analyzing the causes of casting defects and optimizing technological processes, therefore this topic is relevant.

The object of the study was a “housing” part weighing 37 kg made of low-alloy chromium-molybdenum steel, which is included in a very common assortment of many industries. It can be used in harsh environments over a wide range of pressures and temperatures. Thanks to these parameters, it has found its wide application in the oil and gas industry. It is used as a shut-off valve in an oil pipeline when operating under high pressure when interacting with SO₂, which is an unfavorable condition for many steels. There are requirements for dynamic alternating loads, the parameters of which our part corresponds to. A number of other compliance requirements for corrosion resistance and tightness are also provided. The weight of the body with sprues is 168 kg. In this part, a stable defect is observed - this is shrinkage porosity, which is detected during its manufacture as a result of machining. Therefore, this detail was of interest for modeling using the LVMFlow software package.

The scientific novelty of the work is determined by the optimal selection of criteria that affect the provision of a dense structure in a steel casting subject to high shrinkage.

The purpose of the study is to use the applications of Solidworks and LVMFlow CAD programs in sand mold conditions with production technological indicators that ensure the efficient melting of a perfect casting, to design model-flask equipment and improve the manufacturing technology of the "Body" part from steel.

Shortening the tooling manufacturing period and choosing the best casting production option, without unnecessary melting, is the advantage of switching to end-to-end development of technology and tooling for the production of the casing when casting into sand molds. We considered some concepts affecting the defect "Shrinkage porosity" when casting into sand molds, namely: the power of the solidifying casting, the direction of solidification, the heat-accumulating tendency of the molds and rods, the supply of melt into the casting. When considering these concepts, we made an assessment and the degree of influence on the amount of shrinkage was revealed.

Key words: casting, model tooling, solidification, computer modeling, molding mixture, defect, shrinkage.

References

1. Pechenkina L.S. "Modeling of the formation of shrinkage defects in castings", *Proc. of the Int. Sci. and Tech. Conf.: Information Systems and Technologies: Achievements and Prospects (Informatsionnye sistemy i tekhnologii: dostizheniya i perspektivy)*, 2020, pp. 103-105.
2. Popova O., Pechenkina L., Pechenkin A., Popova M., Petrenko V., Demidov A. "The effectiveness of the use of information technologies", *IOP CONF. SER. Mater Science, Kazan, Russia*, 2020, p. 012201
3. Veretennik A.A., Pechenkina L.S. "Analysis of conditions for obtaining castings "Lining with emphasis" in one-time sand molds using computer modeling", *Collection of sci. papers of the winners of the competition of research works of students and post-graduates of VSTU in priority areas of development of science and technology "Scientific Support of the Voronezh Region" (Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti: sb. tr. pobediteley konkursa nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov i aspirantov VGTU po prioritetyam napravleniyam razvitiya nauki i tekhnologii)*, 2017, pp. 14-16.
4. Shchetinin A.V., Pechenkina L.S., Sushko T.I. "Investigation of the cooling process of cast iron castings in the mold", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitetata)*, 2004, no. 7.4, pp. 50-53
5. Prokopenko K.A., Pechenkina L.S. "Modeling of solidification of hull castings", *Proc. of Int. Sci. and Tech. Conf.: AKT-2020, Voronezh*, 2020, pp. 148-149.

Submitted 29.10.2022; revised 16.12.2022

Information about the authors

Larisa S. Pechenkina, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pls-7@mail.ru
Mikhail S. Frolov, BA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: mikhail_fr2001@mail.ru