

**ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

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

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

ISSN 1729-6501 (Print)

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

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

Ответственный секретарь Ю.В. Татаренко – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

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

Телефон: +7 (473) 246-28-63

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2021

12+

**BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL
UNIVERSITY**

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

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

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

ISSN 1729-6501 (Print)

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

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

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

Executive secretary Yu.V. Tatarenko – Voronezh

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

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

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

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

E-mail: vestnik@vorstu.ru

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

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

© Voronezh State Technical University, 2021

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Структура интеллектуальной системы поддержки эволюционных алгоритмов М.А. Белых, В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный, А.К. Донских.....	7
Сходимость вычислительного процесса при реализации вариационного метода решения краевой задачи гидродинамики Д.К. Проскурин, Д.В. Сысоев, С.А. Сазонова.....	14
Создание ассоциативных копий элементов 3D-моделей с импортируемой геометрией А.Н. Юров, Д.Е. Пачевский, В.В. Сокольников	20
Разработка электронной платформы для организации образования онлайн на основе компетентностного подхода С.А. Коваленко, Н.И. Гребенникова, В.А. Малиновкин, П.С. Скочко.....	25
Применение недвоичных систем счисления для организации высокоточных вычислений М.Д. Новичков, Д.А. Орлов.....	32
Модифицированный генетический алгоритм решения задачи выбора серверных ресурсов при формировании инфраструктуры виртуальных рабочих мест Д.К. Проскурин, К.А. Маковий.....	46
Алгоритм детекции букв и строк на изображениях текстов, набранных печатным шрифтом Брайля С.Ф. Якушева.....	52
Решение навигационной задачи с применением системы управления посадкой летательного аппарата с использованием глассадного лазерного маяка Д.А. Смирнов, В.Г. Бондарев, А.В. Тепловодский, А.В. Николенко, К.В. Николенко...	59

Радиотехника и связь

Исследование многолучевых линзовых антенн на основе параллельных печатных плат М.П. Беляев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Р.Е. Рогозин.....	66
Модель недвоичного LDPC-декодера низкой сложности на основе расширенного алгоритма MIN-SUM О.Ю. Макаров, Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, А.С. Демихова.....	73
Синтез фазированной антенной решетки с секторной диаграммой направленности А.В. Останков, А.С. Нечаев, С.Ю. Дамян.....	78
Алгоритм выполнения частотно-временного анализа сигналов с применением непрерывного вейвлет-преобразования и метода периодограмм и его реализация на графическом процессоре Д.В. Козлов, А.Б. Степанов.....	85
Методика определения надежности проектируемых станций спутниковой связи на подвижных объектах Д.Г. Пантенков, В.П. Литвиненко.....	94
Применение технологии изогнутых ММО антенных решеток для сетей пятого поколения И.А. Баранников, К.А. Бердников, С.И. Деревянкин, Е.А. Ищенко, А.И. Сукачев, С.М. Фёдоров.....	104

Вопросы повышения эффективности стока усилителя мощности класса D с коммутацией тока А.В. Шуваев	110
Методика оценки усталостного ресурса печатной платы с использованием принципа линейных накопленных повреждений при различных граничных условиях З.Х.М. Аль-Араджи	114
Система комплексной экспресс-оценки функциональной готовности человека Д.В. Журавлёв, А.А. Проводников	121
Реализации нейронной сети на ПЛИС с использованием аппаратных ресурсов М.В. Хорощайлова	127

Машиностроение и машиноведение

Особенности применения современных информационных технологий в автоматизации машиностроительного производства А.П. Суворов, А.Э. Алешина, Т.П. Сафонова	135
Формообразование осесимметричных оболочек для горячей части турбореактивного двигателя В.И. Максименков, М.В. Молод, В.И. Федосеев	141
Исследование внутренних напряжений в процессе сверления заготовок из цветных сплавов, находящихся в предварительном упругодеформированном состоянии В.В. Куц, А.С. Бышкин, М.С. Разумов	147
Метод определения пластичности малопластичных материалов в условиях высокого гидростатического давления Ю.А. Цеханов, М.Н. Подоприхин, И.В. Шепеленко, Я.Б. Немировский	155

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Structure of the intelligent system for supporting evolutionary algorithms M.A. Belykh, V.F. Barabanov, S.L. Podvalny, A.K. Donskikh	7
Convergence of the computational process when implementing a variational method for solving a boundary value problem of hydrodynamics D.K. Proskurin, D.V. Sysoev, S.A. Sazonova.....	14
Creation of associative copies of elements of 3D models with imported geometry A.N. Yurov, D.E. Pachevskiy, V.V. Sokolnikov.....	20
Development of an electronic platform for organizing online education with a competence-based approach S.A. Kovalenko, N.I. Grebennikova, V.A. Malinovkin, P.S. Skochko.....	25
Application of non-binary numeral systems for organizing high-precision computations M.D. Novichkov, D.A. Orlov.....	32
Modified genetic algorithm for solving the problem of selecting server resources in building the infrastructure of virtual desktops D.K. Proskurin, K.A. Makoviy.....	46
Letter and line detection algorithm in text images typed by printed braille font S.F. Yakusheva.....	52
Solution of a navigation problem with the use of an aircraft landing control system using a glide path laser beacon D.A. Smirnov, V.G. Bondarev, A.V. Teplovodskiy, A.V. Nikolenko, K.V. Nikolenko.....	59

Radio engineering and communication

Investigation of multibeam lens antennas based on parallel printed circuit boards M.P. Belyaev, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, R.E. Rogozin.....	66
Low-complexity non-binary LDPC decoder model based on the extended MIN-SUM algorithm O.Yu. Makarov, N.V. Astakhov, A.V. Bashkirov, M.V. Khoroshaylova, A.S. Demikhova.....	73
Synthesis of phased array antenna with flat-topped directional pattern A.V. Ostankov, A.S. Nechaev, S.Yu. Dachian.....	78
Time-frequency signal analysis algorithm using continuous wavelet transform and welch's periodogram method with its implementation on graphical processing unit D.V. Kozlov, A.B. Stepanov.....	85
Mathematical apparatus for determining the reliability of projected satellite communication stations on mobile objects D.G. Pantenkov, V.P. Litvinenko.....	94
Applying conformal MIMO antenna arrays for fifth generation networks I.A. Barannikov, K.A. Berdnikov, S.I. Derevyankin, E.A. Ishchenko, A.I. Sukachev, S.M. Fyedorov.....	104
Questions of improving the drain efficiency of a class D power amplifier with current switching A.V. Shuvaev.....	110

New method for estimating the fatigue life of a printed circuit board using the principle of linear accumulated damage under various boundary conditions	
Z.H.M. Al-Araji	114
System of comprehensive express evaluation of human functional readiness	
D.V. Zhuravlev, A.A. Provodnikov	121
Implementation of a neural network on FPGA using hardware resources	
M.V. Khoroshaylova	127
Mechanical engineering and science of machines	
Application of modern information technologies in automation of machinery production	
A.P. Suvorov, A.E. Alyeshina, T.P. Safonova	135
Formation of axisymmetric shells for the hot part of a turbojet engine	
V.I. Maksimenkov, M.V. Molod, V.I. Fedoseev	141
Research of change in internal stresses in the process of drilling blocks from non-ferrous alloys in a preliminary elastic-deformed state	
V.V. Kuts, A.S. Byshkin, M.S. Razumov	147
Method for determining the plasticity of low-plastic materials under high hydrostatic pressure	
Yu.A. Tsekhanov, M.N. Podoprikin, I.V. Shepelenko, Ya.B. Nemirovskiy	155

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.3.001

УДК 004.4

СТРУКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ

М.А. Белых, В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный, А.К. Донских

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: производится краткий обзор эволюционных алгоритмов как методов поиска и оптимизации при моделировании различных процессов и управлении сложными объектами. Основным критерием рассмотрения алгоритмов является практическая эффективность в решении оптимизационных задач, в частности, задачи поиска оптимального маршрута. В качестве алгоритмов, перспективно подходящих для внедрения в структуру интеллектуальной системы поддержки эволюционных алгоритмов, рассматриваются генетический алгоритм, алгоритм муравьиной колонии и алгоритм пчелиной колонии, отмечены их преимущества и недостатки. Осуществлен краткий обзор программных средств, работающих на базе эволюционных алгоритмов, с указанием их сильных и слабых сторон, в частности, их ориентированность на определенный алгоритм. Разработана структурная схема интеллектуальной системы поддержки эволюционных алгоритмов, которая обладает универсальностью и не привязана к конкретному алгоритму. Интеллектуальная система состоит из совокупности модулей: интерфейсный модуль, модуль работы с документами, модуль математического ядра поддержки ЭА, модуль настроек, модуль формирования целевой функции, модуль справочной системы, графический модуль. Приведено описание функционирования каждого из них. Система позволяет осуществить выбор оптимального решения, варьируя параметры и используя инструменты, предоставленные системой или заданные пользователем

Ключевые слова: интеллектуальная система, поиск оптимального маршрута, эволюционные алгоритмы, генетический алгоритм, муравьиный алгоритм, пчелиный алгоритм

Введение

На данный момент идет стремительное развитие интеллектуализации систем поддержки принятия решений, осуществление моделирования различных процессов и управление сложными объектами. В рамках этих направлений осуществляются разработки эволюционных алгоритмов (ЭА), которые в искусственном интеллекте базируются на природных процессах и естественном отборе.

Основная идея ЭА заключается в компьютерном моделировании некоторых природных процессов, результаты которого направлены на решение актуальных задач оптимизации. Среди представителей эволюционных алгоритмов в решении задач построения оптимального маршрута особенно выделяются три: генетический алгоритм, алгоритм муравьиной колонии и алгоритм пчелиной колонии.

Эволюционные алгоритмы как методы поиска и оптимизации маршрута

Генетический алгоритм применяется

для решения задач оптимизации, которые основаны на методе случайного поиска. В список таких входят задачи в сферах бизнеса и финансов, исследования технических проблем, разработки вычислительных структур, моделирования нейронных сетей [1,2]. Преимуществами генетического алгоритма являются:

- работа с кодами, которые являются формализованными параметрами, аргументами целевой функции;
- обработка одновременно нескольких точек пространства, что позволяет говорить об эффективном распараллеливании;
- отсутствие необходимости использования опциональной информации в ходе работы (исключением являются материалы об области допустимых значений и целевой функции в произвольной функции);
- применение вероятностных и детерминированных правил при построении новых точек пространства.

К недостаткам генетического алгоритма относятся:

- отсутствие вероятности получения оптимального решения, то есть нельзя однозначно сказать, будет ли в итоге достигнута сходимость или нет;

- высокая эффективность работы только специалистом;
- высокая вычислительная ресурсоемкость, вследствие чего скорость работы в случаях простых функций значительно ниже, чем у других алгоритмов;
- малая эффективность на заключительных этапах моделирования.

Алгоритм муравьиной колонии (муравьиный алгоритм) является имитацией организации поведения муравьиной колонии. Колонией является мультиагентная система, в которой каждый отдельный представитель данной системы действует самостоятельно по некоторым определенным правилам. Алгоритм работы представляет вероятностную эвристику, в которой вероятности устанавливаются в соответствии с информацией о качестве решения на основе предыдущих решений [3].

Преимуществами муравьиного алгоритма являются:

- сравнительная эффективность в решении задачи коммивояжера;
- лучшая в сравнении с другими методами глобальной оптимизации эффективность;
- меньшая вероятность неподходящих начальных условий;
- упор на память всей колонии в целом;
- применимость к различным задачам.

К недостаткам муравьиного алгоритма относятся:

- сложный теоретический анализ;
- вероятность высокого времени получения сходимости;
- вероятность необходимости применения дополнительных методов;
- зависимость от параметров настройки.

Алгоритм пчелиной колонии (или пчелиный алгоритм) характеризуется как система роевого интеллекта. Он основывается на имитации поведения колонии пчёл. Поведение пчел колонии принято считать адаптивным. В то время как одни пчелы собирают нектар, другие, выступающие в роли разведчиков, в это же время выполняют поиск перспективных мест, что позволяет колонии сразу быстро адаптироваться к уже имеющимся запасам ресурсов.

Данный алгоритм выделяется такой особенностью работы, как возможность эффективного распараллеливания процессов, что приводит к увеличению скорости работы алгоритма и, как следствие, сокращению времени получения результатов поиска.

Преимуществами пчелиного алгоритма являются:

- подходит для оптимизации таких функций, которые не являются в области определения унимодальными;
- не требует тщательного подбора коэффициентов;
- исключает погрешность косвенных изменений и модельную погрешность;
- надежность и высокая гибкость из-за небольшого числа параметров;
- высокая скорость работы при распараллеливании процессов.

Недостатки пчелиного алгоритма включают:

- требование новых тестов на пригодность для новых параметров для улучшения производительности;
- значительное снижение скорости работы при использовании в последовательной обработке;
- необходимость в большом количестве оценок объективных функций.

Обобщая вышеперечисленное, можно выделить следующее:

- генетический алгоритм применим в случаях, когда время не ограничено либо не играет существенной роли в задаче;
- муравьиный алгоритм устойчив к неподходящим начальным условиям и оперирует информацией от всей колонии в целом;
- пчелиный алгоритм эффективен в случаях необходимости наиболее быстрого получения результатов оптимизации.

Обзор программных средств на базе эволюционных алгоритмов

Существуют готовые программные решения, реализующие работу эволюционных алгоритмов.

Программное средство AntColonySystem – консольная реализация муравьиного алгоритма, написанная на языке C#. Достоинством программного средства является возможность свободного доступа к программному коду для изменения начальных параметров. Недостатком является отсутствие графического интерфейса, из-за чего результаты расчетов представляются в виде итогового значения наилучшего маршрута без подробностей [4].

Программное средство ABC2 производит вычисления, базируясь на алгоритме пчелиной колонии. Интерфейс программы позволяет не только установить параметры в необходимые

значения, но и выбрать функцию для расчета, а также визуализирует результаты в виде графика, как показано на рис. 1. Недостатком данного программного средства является наличие только англоязычного интерфейса [5].

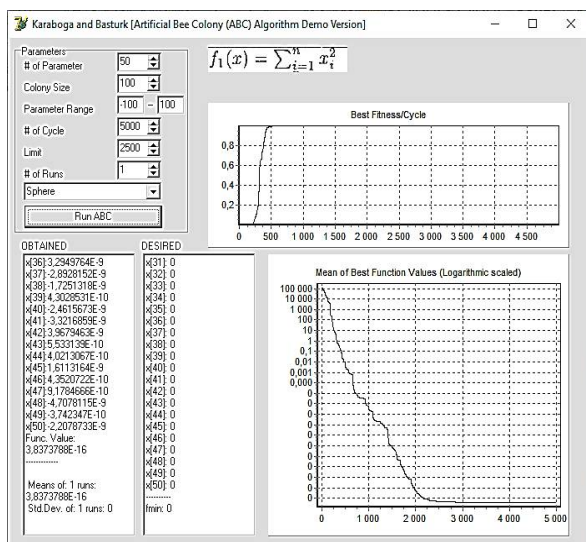


Рис. 1. Интерфейс программного средства ABC2

Пакет MatLAB предоставляет самые широкие возможности применения генетического алгоритма для решения оптимизационных задач. Являясь универсальным математическим пакетом, он предоставляет огромное количество возможностей построения ЦФ, способов

задания параметров и отображения выходной информации. При этом он имеет относительно широкие возможности настройки ГА [6].

Эти и другие подобные программные средства, помимо своих собственных недостатков, отличают общие – отсутствие универсальности и привязанность к конкретному алгоритму. Эти проблемы должна решить разрабатываемая интеллектуальная система поддержки эволюционных алгоритмов (ИСПЭА), которая имеет возможность использовать набор алгоритмов, встроенных в ее структуру [7].

Структура интеллектуальной системы поддержки эволюционных алгоритмов

Одним из вариантов реализации интеллектуальной среды является система, структура которой изображена на рис. 2, в состав которой входят:

- интерфейсный модуль;
- модуль работы с документами;
- модуль математического ядра поддержки ЭА;
- модуль настроек;
- модуль формирования целевой функции (ЦФ);
- модуль справочной системы;
- графический модуль.

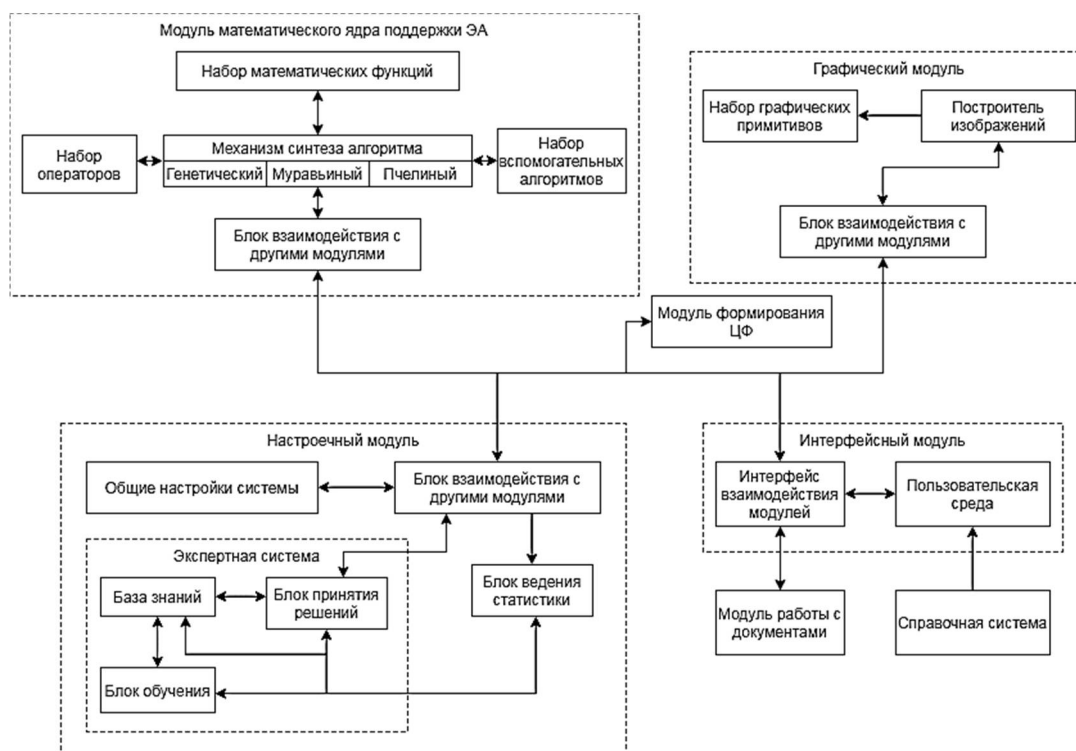


Рис. 2. Структурная схема интеллектуальной системы поддержки эволюционных алгоритмов (ИСПЭА)

Интерфейсный модуль предоставляет пользователю необходимые инструменты, в том числе возможность настройки алгоритмов, а также просмотр результатов работы. Помимо этого на данный модуль возлагается задача по обеспечению взаимодействия между остальными модулями ИСПЭА.

Каждый модуль должен быть независимым от работы других модулей. Для связи между модулями используются модули, отвечающие за их взаимодействие. Интерфейс системы предназначен для приема и передачи сообщений. При таком подходе имеет смысл заблокировать собственные данные модуля от перезаписи другими компонентами во время его работы.

Также интерфейс не должен работать с другими частями ИСПЭА, т.к. в случае дополнения и модификации системы имеются сложности с изменением и добавлением исходного кода сразу в несколько модулей.

Также необходимо исключить возможности непосредственного взаимодействия интерфейса с остальными элементами ИСПЭА: это связано с проблематичным внесением изменений в код программы при дальнейшей доработке в случае возникновения потребности изменения более чем одного модуля.

Ядро поддержки ИСПЭА занимается обработкой данных, выполнением ЭА и вспомогательными процедурами. К нему выдвигаются следующие требования:

- наличие в составе трех алгоритмов (генетического, муравьиного и пчелиного), а также вспомогательных функций;
- обеспечение механизма вызова любого алгоритма по запросу пользователя;
- обеспечение возможности получения и передачи данных другим модулям в составе системы;
- наличие в составе инструментов получения и обработки статистических материалов в ходе работы алгоритмов для пополнения аналитической базы.

Наличие в составе ядра упомянутых выше алгоритмов позволит решать задачи оптимизации с различными требованиями и условиями, находя наиболее оптимальный вариант решения. С учетом всех факторов, математическое ядро должно состоять из:

- набора операторов ЭА;
- механизма синтеза ЭА и отработки каждого из них;

- вспомогательных алгоритмов, включая математические функции;
- блока обмена данными с другими модулями.

Настроечный модуль должен отвечать за детализацию настроек системы в целом и ЭА в частности. В число таких настроек входят задание начальных параметров алгоритмов и общие настройки их работы. Также этот модуль предоставляет для пользователя набор рекомендаций, связанных с настройкой каждого алгоритма, опираясь на начальные условия.

Формат экспертной системы с диалоговым окном настройки отлично подходит для реализации описанного функционала. В такой реализации справочная система будет предоставлять необходимую информацию, а база данных будет выступать в роли аналитической базы знаний. Данная база должна содержать в себе различные преднастроенные конфигурации для каждого алгоритма в соответствии с категориями задач для повышения эффективности, причем подразумевается, что данная база будет пополняться в ходе сбора статистики работы ИСПЭА.

Модуль формирования ЦФ ответственен за создание функции для выбранного алгоритма. Он предназначен для работы в связке с ИСПЭА и обеспечивает обработку введенной пользователем функции и вычисление её значения. Входными данными являются:

- целевая функция (или несколько ЦФ) в текстовом виде;
- условия и ограничения, накладываемые на ЦФ;
- массив (матрица) вещественных чисел, представляющий собой набор аргументов функции на текущем шаге алгоритма;
- массив (матрица) вещественных чисел, представляющий собой список дополнительных параметров целевой функции.

Размер первого массива может колебаться от 1 до нескольких тысяч, размер второго массива колеблется от 0 до нескольких тысяч.

В качестве выходных данных выступает вещественное число, представляющее собой результат вычисления ЦФ. Обобщенная структура модуля представлена на рис. 3.



Рис. 3. Обобщенная структура модуля генерации ЦФ

Для разработки модуля рекомендуется разработать формальный язык, обеспечивающий возможность задания основных видов ЦФ. Укрупненный алгоритм взаимодействия обработчика ЦФ с ИСПЭА представлен на рис. 4.

Основные математические функции, поддерживаемые модулем:

- «+», «-» (как знак числа и как мат. операция), «*», «/»;
- « \sum » (с возможностью задания интервала изменения переменной «i», в том числе в виде «n», «n+1», а также использования нескольких переменных («i», «j», «k»));
- « \prod » (аналогично \sum);
- « $\sqrt{\quad}$ » (желательна возможность задания не только квадратного корня);
- «возведение в степень» (в произвольную степень и произвольного числа);
- «min» и «max» (с возможностью задания количества сравниваемых элементов по индексам);
- «sin», «cos», «tg», «ctg» (желательна возможность их вычисления от других функций);
- «log»;
- дополнительные символы (числа Π , e и т.д.).

Взаимодействие с графическим модулем основывается на преобразовании исходных данных для ИСПЭА и результатов работы каких-либо ЭА из данных, понятных машине, в какой-либо графический вид, например, изображение (рисунок), график, блок-схема и т.д. В данном случае подразумевается возможность

отрисовки данным модулем графических примитивов.

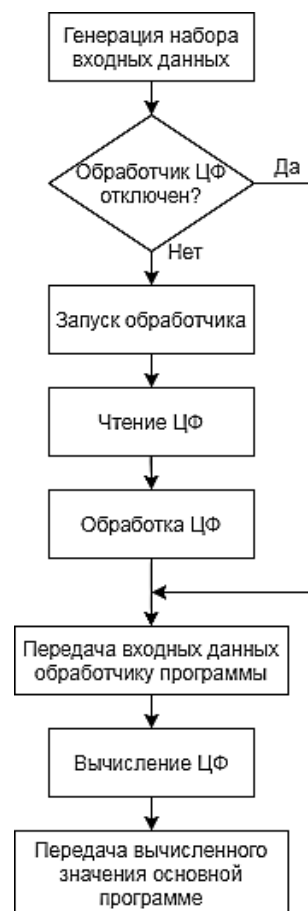


Рис. 4. Укрупненный алгоритм взаимодействия обработчика ЦФ с ИСПЭА

Модуль работы с документами отвечает за создание входных и выходных данных системы, их сохранение и редактирование. Файл входной информации предполагает содержание следующих данных:

- информацию об алгоритме и его настройках;
- информацию о пространстве решений задачи, а также ее ограничений;
- информацию о целевой функции.

Предполагается, что общие настройки системы располагаются в обособленном файле. В качестве выходных данных выступает решение задачи в символьном либо графическом виде, если результаты возможно визуализировать средствами ИСПЭА. Модуль должен осуществлять обмен информацией только с интерфейсом системы.

Работа модуля справочной системы заключается в предоставлении пользователю информации об эксплуатации ИСПЭА, под-

держиваемых ею алгоритмах, особенностях функционирования системы и осуществления настроек для каждого алгоритма в составе системы, а также предоставлять текущую версию программы.

Заключение

В данной статье была представлена структурная схема интеллектуальной системы поддержки эволюционных алгоритмов, которая призвана стать универсальным инструментом.

Основное отличие системы – наличие в ее составе нескольких алгоритмов, что позволяет решать различного рода задачи с максимальной эффективностью путем выбора наиболее оптимального набора параметров и инструментов из предоставленных системой или заданных самим пользователем.

В перспективе данная система может быть дополнена другими алгоритмами, что позволит расширить спектр решаемых задач.

Поступила 16.03.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

Белых Михаил Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: belykh.ma@yandex.ru, тел. 8(900)931 21 94

Барабанов Владимир Федорович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bvf@list.ru, тел. 8(952)957 28 50

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел. 8(920)011 21 53

Донских Андрей Константинович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ak_donskikh@mail.ru, тел. 8(980)542 25 12

STRUCTURE OF THE INTELLIGENT SYSTEM FOR SUPPORTING EVOLUTIONARY ALGORITHMS

M.A. Belykh, V.F. Barabanov, S.L. Podvalny, A.K. Donskikh

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we give a brief review of evolutionary algorithms as search and optimization methods for modeling various processes and managing complex objects. The main criterion for considering algorithms is practical efficiency in solving optimization problems, in particular, the problem of finding the optimal route. We considered the genetic algorithm, the ant colony algorithm and the bee colony algorithm as algorithms that are promisingly suitable for introducing into the structure of an intelligent system for supporting evolutionary algorithms, we noted their advantages and disadvantages. We carried out a brief overview of software tools based on evolutionary algorithms, with an indication of their strengths and weaknesses, in particular, their focus on a specific algorithm. We developed a structural diagram of an intelligent system for supporting evolutionary algorithms, which is universal and not tied to a specific algorithm. The intelligent system consists of a set of modules: an interface module, a module for working with documents, a module for the mathematical core of EA support, a settings module, a module for generating an objective function, a help system module, a graphic module. We give a description of the functioning of each of them. The system allows one to select the optimal solution by varying the parameters and using tools provided by the system or specified by the user

Key words: intelligent system, search for the optimal route, evolutionary algorithms, genetic algorithm, ant algorithm, bee algorithm

Литература

1. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 520 с.
2. Генетические алгоритмы. Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://itteach.ru/predstavlenie-znaniy/geneticheskie-algoritmi>
3. Муравьиные алгоритмы. Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://blog.bullgare.com/wp-content/uploads/2019/05/aca.pdf>
4. AntColonySystem. Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://github.com/mbalchanowski/Ant-Colony-System>
5. ABC2. Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://abc.erciyes.edu.tr/>
6. Седых И.А., Сметанникова А.М. Применение пакета matlab для параметрической идентификации окрестностей моделей на основе генетических алгоритмов // Вестник ВГУ. 2017. №4. С. 25-30.
7. Барабанов В.Ф., Дворецкая Н.В. Структура интеллектуальной системы поддержки генетических алгоритмов // Информационные технологии моделирования и управления. 2008. № 3(46). С. 324-328.

References

1. Rutkovskiy L. "Methods and technologies of artificial intelligence" ("Metody i tekhnologii iskusstvennogo intellekta"), Moscow, Goryachaya Liniya Telekom, 2010, 520 p.
2. "Genetic algorithms", available at: <https://itteach.ru/predstavlenie-znaniy/geneticheskie-algoritmi>
3. "Ant algorithms", available at: <https://blog.bullgare.com/wp-content/uploads/2019/05/aca.pdf>
4. "AntColonySystem", available at: <https://github.com/mbalchanowski/Ant-Colony-System>
5. "ABC2", available at: <https://abc.erciyes.edu.tr/>
6. Sedykh I.A., Smetannikova A.M. "Application of the Matlab package for parametric identification of neighborhood models based on genetic algorithms", *Bulletin of Voronezh State University (Vestnik VGU)*, 2017, no. 4, pp. 25-30.
7. Barabanov V.F., Dvoretzkaya N.V. "The structure of an intelligent system for supporting genetic algorithms", *Information Technologies for Modeling and Control (Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2008, no. 3(46), pp. 324-328.

Submitted 16.03.2021; revised 21.06.2021

Information about the authors

Mikhail A. Belykh, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: belykh.ma@yandex.ru, tel.: +7(900)931 21 94

Vladimir F. Barabanov, Dr. Sc., Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: bvf@list.ru, tel.: +7(952)957 28 50

Semyen L. Podvalny, Dr. Sc., Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel.: +7(920)011 21 53

Andrey K. Donskikh, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: ak_donskikh@mail.ru, tel.: +7(980)542 25 12

СХОДИМОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ВАРИАЦИОННОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ГИДРОДИНАМИКИ

Д.К. Проскурин, Д.В. Сысоев, С.А. Сазонова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: анализируются результаты применения вариационного метода решения краевой задачи гидродинамики. С точки зрения численного исследования задач математической физики эти вариационные постановки рассматриваются как основа проекционных методов (метод Ритца). Рассматриваемая задача сводится к исследованию волновых колебаний свободной поверхности идеальной несжимаемой жидкости, находящейся внутри осесимметричной полости и подверженной действию однородного поля массовых сил. Представлены основные методики, позволяющие снизить затраты машинного времени и ускорить сходимость вычислительного процесса при расчете гидродинамических характеристик полостей различной конфигурации. Использование метода Трефтца позволяет сократить время расчета краевой задачи. Преобразование позволяет свести трехмерный интеграл к одномерному. Это создает универсальный метод определения гидродинамических коэффициентов для полостей вращения с произвольным контуром меридианного сечения. Однако для большинства конфигураций резонаторов скорость сходимости является удовлетворительной и обеспечивает численные значения с высокой степенью точности. Учитывая, что функции Бесселя дают быструю сходимость, но не являются полными, а полиномы Лежандра обладают полнотой, было реализовано построение вариационного ряда на основе «смешанной» системы функций. Эта методика позволила нам значительно ускорить и улучшить процесс сходимости для неблагоприятных случаев, когда использование каждой системы координатных функций в отдельности не привело к успеху

Ключевые слова: гидродинамика, вариационный метод, волновые колебания, жидкость, метод Трефтца, метод Ритца, цилиндрические функции, граничные условия, уравнение Лапласа

Введение

Наиболее сложным в краевой задаче гидродинамики является удовлетворение граничных условий на поверхности полости произвольной конфигурации. Методы решения задачи [1,2] при использовании современной вычислительной техники приводят к удовлетворительным численным результатам для ряда конкретных конфигураций полостей, но, однако, являются достаточно трудоемкими. В связи с растущими потребностями практики возникла проблема эффективного вычисления гидродинамических коэффициентов для произвольного тела с жидкостью. Способ универсализации вычислительных программ рассматривался в работе [2]. Ниже обсуждаются вопросы повышения точности и ускорения вычислительного процесса.

Сходимость метода Ритца

Твердое тело с полостью, частично заполненной идеальной несжимаемой жидкостью, в однородном поле массовых сил представляет собой консервативную систему, к которой

можно применить вариационный принцип Гамильтона – Остроградского.

Функции, дающие экстремальные значения действия по Гамильтону, удовлетворяют следующей однородной краевой задаче с параметром в граничном условии:

$$\Delta\varphi = 0, \quad \left. \frac{\partial\varphi}{\partial\vartheta} \right|_S = 0, \quad \frac{\partial\varphi}{\partial\vartheta_\Sigma} = Z\varphi, \quad (1)$$

неоднородной краевой задаче

$$\Delta\Psi_i = 0, \quad \left. \frac{\Delta\Psi_i}{\partial\vartheta} \right|_{S+\Sigma} = (R \times \vartheta)_i \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

Здесь S – смоченная часть поверхности полости; Σ – свободная поверхность жидкости; R – радиус-вектор; ϑ – орт внешней нормали к поверхности жидкости; Z – частотный параметр, представляющий собственные числа краевой задачи (1).

Краевая задача (1) в силу самосопряженности и положительности операторов имеет дискретное множество положительных собственных значений Z_n , каждому из которых соответствует собственная функция φ_n . В дальнейшем будем рассматривать только низ-

шее собственное значений ($n = 1$) и соответствующую ему собственную функцию, так как более высокие гармоники в жесткой полости практически не важны. Вследствие этого индекс n опускаем. Краевой задаче (2) удовлетворяют функции, называемые потенциалами Жуковского [2].

Для решения вариационных задач используется метод Ритца – Трефтца. Например, функция φ представляется в виде линейной комбинации координатных функций γ_j .

$$\varphi = \sum_{j=1}^k a_j \gamma_j. \quad (3)$$

Здесь a_j – неопределенные постоянные, образующие k – мерный вектор-столбец \mathbf{a} .

Вычисляются элементы квадратных k – мерных матриц \mathbf{A} и \mathbf{B} .

$$a_{ij} = \int_{\tau} \nabla \gamma_j \nabla \gamma_i d\tau; \quad \beta_{ji} = \int_Z \gamma_j \gamma_i dS. \quad (4)$$

Затем из решения линейной однородной системы алгебраических уравнений

$$\mathbf{Aa} + \mathbf{ZBa} = 0$$

определяются собственное значение λ и собственный вектор \mathbf{a} . Аналогичным образом определяются и потенциалы Жуковского Ψ_i . Быстрота сходимости метода Ритца от типа выбранной последовательности функции γ_j . Для обеспечения сходимости вычислительного процесса в среднем требуется лишь условие полноты применяемой системы координатных функций и не требуется, чтобы функции γ_j удовлетворяли граничным условиям задачи (1), так как последние являются естественными. Однако в общем случае сходимость может оказаться медленной, и вычислительный процесс, из-за неизбежно накапливающихся ошибок округления, становится неустойчивым.

Метод Трефтца

Рассмотрим основные приемы, позволяющие сократить затраты машинного времени и ускорить сходимость вычислительного процесса при расчетах гидродинамических характеристик полостей различной конфигурации. Прежде

де всего, в формулах (4) для a_{ij} строят трехмерные интегралы по объему, вычисление которых даже на современных ЭВМ требует много времени. Если ограничиться только классом осесимметричных полостей, то можно, вводя цилиндрическую систему координат x, r, η , отделить круговую координату η , интегралы по объему τ свести к двумерным интегралам по площади меридионального сечения G , а двумерные интегралы по свободной поверхности Σ свести к одномерному интегралу по ее контуру Γ_0 . Такое же преобразование производится и в случае отсека полости вращения, образованного двумя сплошными радиальными перегородками [2].

Следующим шагом на пути сокращения времени вычислений является использование метода Трефтца, который отличается от метода Ритца тем, что координатные функции должны удовлетворять дифференциальному уравнению. Для краевых задач (1), (2) систему координатных функций в этом случае необходимо выбирать из класса гармонических функций. Применяя преобразование Грина и отделяя круговую координату η , в случае полости вращения трехмерный интеграл (4) можно свести к следующему одномерному:

$$a_{ij} = \int_{\Gamma} \gamma_j \frac{\partial \gamma_j}{\partial \vartheta} r dS. \quad (5)$$

Здесь Γ – контур меридиального сечения объема жидкости.

Наиболее часто в методе Трефтца применяют две системы координатных функций: цилиндрические функции

$$\gamma_j = \begin{cases} sh(\xi_n x) \\ ch(\xi_n x) \end{cases} \begin{cases} J_m(\xi_n r) \\ N_m(\xi_n r) \end{cases} \begin{cases} \sin m\eta \\ \cos m\eta \end{cases} \quad (6)$$

и сферические функции

$$\gamma_j = \begin{cases} R^n \\ R^{(-n-1)} \end{cases} \begin{cases} P_n^m(y) \\ Q_n^m(y) \end{cases} \begin{cases} \sin m\eta \\ \cos m\eta \end{cases}; \quad (7)$$

$$R = \sqrt{x^2 + r^2}; \quad y = \frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}}.$$

Здесь индекс j определяется двухпараметрическим множеством целых натуральных чисел n и m .

Скорость сходимости метода Трефтца увеличивается, если координатные функции удо-

влетворяют большому числу условий краевой задачи. В каждом конкретном случае для определения конфигурации полости можно подобрать более оптимальную последовательность координатных функций. Более быструю сходимость могут обеспечить функции, даже не обладающие свойством полноты, но удовлетворяющие большому числу условий краевой задачи. Например, в случае решения задачи для конических полостей вариационный метод очень быстро сходится при использовании в качестве координатной специально построенной системы «конических» функций [1], удовлетворяющих как дифференциальному уравнению, так и граничным условиям на смоченной части поверхности. Для цилиндрической полости с пологими днищами хорошая сходимость при решении однородной задачи (1) была получена с использованием системы цилиндрических функций (5), удовлетворяющих как уравнению, так и граничному условию на свободной поверхности [2]. Однако система функций (5) не обладает свойством полноты на произвольной поверхности и вследствие этого результаты решения неоднородной краевой задачи (2) являлись неверными [3]. Эта система функций становится полной, если в нее включить еще функции

$$\{r^m, xr^m, I_m(\zeta_n r), K_m(\zeta_n r)\} \begin{Bmatrix} \sin m\eta \\ \cos m\eta \end{Bmatrix}.$$

Здесь I_m, K_m – модифицированные функции Бесселя и Ханкеля.

При решении краевых задач (1), (2) методом Трефтца хорошо зарекомендовала себя система сферических функций (7), обладающая свойством полноты, которая использовалась некоторыми авторами для определения гидродинамических характеристик целого ряда конкретных полостей [2]. Для построения практически сходящейся последовательности сферических функций предложен [4] метод «проб», в котором при наращивании вариационного ряда из четырех типов очередных функций использовалась та, которая дает минимальное значение собственной частоты. Это и ряд других приемов позволили создать универсальный метод определения гидродинамических коэффициентов для полостей вращения с произвольным контуром меридионального сечения. При этом для большинства конфигураций полостей скорость сходимости была удовлетворительной и обеспечивала получение численных значений с высокой степенью точности, однако в ряде

случаев k членов ряда (3) становилось больше 10-15, а удовлетворительная сходимость вычислительного процесса не достигалась. Обычно из-за плохой обусловленности матриц A и B при таких значениях k наступала потеря устойчивости счета. Плохая сходимость объяснялась тем, что первые функции вариационного ряда плохо удовлетворяли граничным условиям.

При решении однородной краевой задачи (1) граничное условие при переходе со свободной поверхности жидкости на смоченную поверхность терпит разрыв. Если в последовательности координатных функций есть функция, производная от которой по нормали к поверхности объема жидкости содержит такой же разрыв, то ряд должен сходиться быстрее. Действительно, применение цилиндрических функций свидетельствует о быстрой сходимости вариационного метода [2, 3], так как производная по нормали от этих функций содержит разрыв на контуре свободной поверхности. Этим объясняются удовлетворительные результаты приближенного метода [5], в котором решение краевой задачи записывается в виде первой цилиндрической функции первого рода, а значение параметра определяется из условий выполнения граничного условия на контуре свободной поверхности жидкости. В этом случае решение на границе имеет такой же разрыв, как и граничное условие. При более точном приближенном решении [6] граничное условие на контуре свободной поверхности жидкости предлагается удовлетворять не только по углу наклона касательной, но и по кривизне стенок полости. В последнем случае разность между истинным решением на границе и приближенным решением имеет гладкость не только по первой, но и по второй производной. Однако эти решения дают удовлетворительную точность лишь для случая глубокой жидкости и достаточно гладкой поверхности стенок полости. Например, для цилиндрической полости с вогнутыми днищами эти приближенные методы не пригодны.

«Смешанные» функции системы

Из анализа имеющихся результатов видно, что скорость сходимости вычислительного процесса зависит от того, насколько удачно выбраны первые функции. Учитывая, что функции Бесселя (6) дают быструю сходимость, но не полны, а полиномы Лежандра (7) обладают полнотой, было реализовано построение вариационного ряда (3) по «смешанной»

системе функций, включающей в себя как цилиндрические, так и сферические функции. Этот прием позволил существенно ускорить и улучшить процесс сходимости для неблагоприятных случаев, когда использование каждой системы координатных функций порознь не приводило к успеху. Однако необходимо было использовать функции Бесселя (6) для нескольких первых корней ξ_n .

Как отмечалось в [2], если построить приближенное решение по уже известному значению собственной частоты свободных колебаний жидкости, то оно будет выражаться также через функцию Бесселя (6), но с параметром ξ , не совпадающим с параметром ξ_n . В меньшей степени, но также не совпадает полученный [5, 6] параметр ξ , который находится из условия равенства нулю нормальной производной к полости на контуре нормальной поверхности

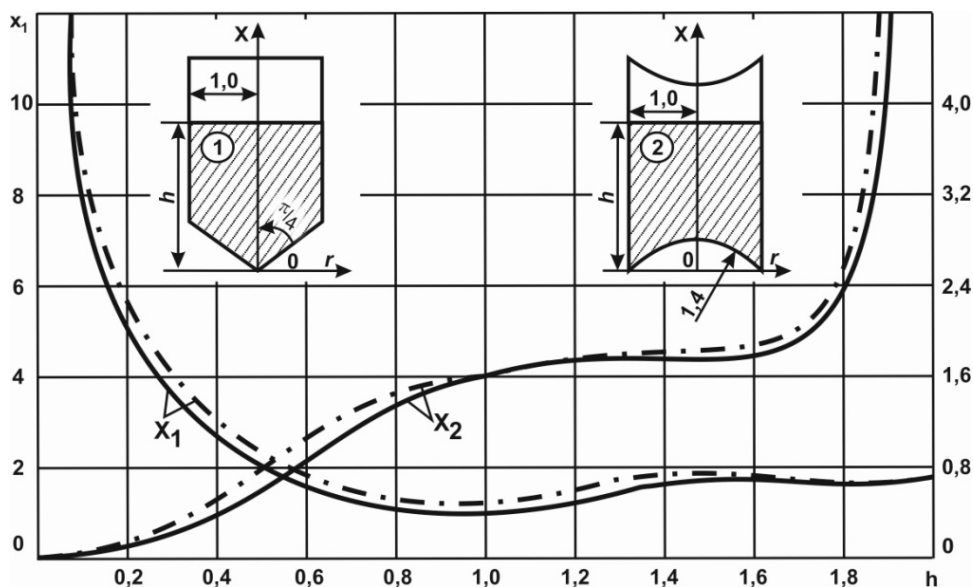
$$\left(ctg(\theta) + \frac{1}{\xi} \right) J_1(\xi) - J_0(\xi) = 0, \quad (8)$$

где θ – угол наклона касательной к поверхности полости на контуре Σ .

На основе анализа зависимости решения краевой задачи (1) от значения параметра ζ первую функцию можно представить в виде

$$\gamma_1 = \frac{r_0 c H \left[\zeta(x - x_\Sigma + h)/r_0 \right] J_1(\zeta r/r_0)}{\zeta sh(\zeta h/r_0) J_1(\zeta)} \sin(\eta). \quad (9)$$

Здесь r_0 – радиус свободной поверхности жидкости; H – максимальная глубина жидкости; x_Σ – координата свободной поверхности; величину ζ следует находить путем варьирования из условия минимума собственного значения Z .



Точные значения частотного параметра Z для двух конфигураций цилиндрических полостей: 1) цилиндрическая полость с коническим дном и углом раскрытия $\pi/4$; 2) цилиндрическая полость с двумя вогнутыми сферическими днищами, соотношение радиуса которого к радиусу цилиндра равен 1,4

Такой подход позволил получить довольно точные результаты практически уже из одночленного приближения, т.е. методом Релея.

Еще более точные результаты получены при использовании первой сферической функции (7) второго типа, имеющей следующий вид:

$$\gamma_1 = r[(x - L)^2 + r^2]^{-3/2} \sin(\eta). \quad (10)$$

Здесь L – параметр, характеризующий сдвиг начала координат, который следует варь-

ировать, чтобы обеспечить минимум свободного значения Z .

Границы значений параметра L должны быть выбраны так, чтобы особенность функции (10) находилась вне области, занятой жидкостью. Наличие параметра варьирования ζ в функции (9) и параметра L в функции (10) позволяет максимально приблизить эти функции в среднем к граничным условиям краевой задачи (1) вне зависимости от вида полости и тем самым получать значение частоты уже в первом приближении с точностью до $1 \div 3\%$. На рисунке сплошными линиями показаны точные

значения частотного параметра Z для двух конфигураций цилиндрических полостей: 1) цилиндрическая полость с коническим днищем, угол раствора которого $\pi/4$, и 2) цилиндрическая полость с двумя вогнутыми сферическими днищами, отношение радиуса которых к радиусу цилиндра равно 1,4. Полное удлинение полостей равно 3,0. В этом случае известные приближенные методы [5, 6] не учитывают геометрию днищ в баках и дают слишком грубые результаты. Результаты, полученные с использованием оптимально построенной функции (9), показаны штрихпунктирной линией, а с использованием оптимально построенной функции (10) практически совпали с точными результатами и потому не видны. Для менее сложных конфигураций полостей типа сферы, конуса или цилиндра с выпуклыми днищами оптимальными функциями (9) или (10) обеспечивается еще более высокая точность. Затраты машинного времени при выборе оптимального значения параметра ζ или L незначительны, так как зависимость $H(\zeta)$ или $Z(L)$ имеет ярко выраженный экстремум, представляющий величину параболы. Затраты машинного времени минимальны при построении оптимальной функции (10), имеющей очень простое выражение.

Выводы

Таким образом, функции (9) или (10) точно удовлетворяют уравнению Лапласа, удовлетворяют в среднем граничным условиям краевой задачи (1), благодаря чему значительно ускоряют процесс сходимости метода Трефтца, а в большинстве случаев уже сами дают практически точные значения интегральных гидродинамических характеристик.

Литература

1. Докучаев Л.В. К решению краевой задачи о колебаниях жидкости в конических полостях // Прикладная математика и механика. 1964. Т. 28. №1. С. 151-154.
2. Методы расчета присоединенных масс жидкости в подвижных полостях / С.Ф. Фещенко, И.А. Луковский, Б.И. Рабинович и др. Киев: Наук. думка, 1969. 250 с.
3. Рабинович Б.И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 416 с.
4. Lin B., Chandler-Wilde S.N. Numerical conformal mapping and mesh generation for polygonal and multiply-connected regions // J. Hydroinformatic. 2000. Vol. 02. No. 4. Pp. 255-267.
5. Докучаев Л.В., Стажков Е.М. Определение гидродинамических характеристик произвольных полостей вращения вариационным методом // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1974. №3. С. 44-49.
6. Стажков Е.М. Алгоритм численного решения задачи по определению частот и присоединенных масс жидкости при расчете колебаний конструкций с жесткими резервуарами // Исследования по теории сооружений. 1974. Т. 20. С. 62-73.
7. Липанов А.М., Кисаров Ю.Ф., Ключников И.Г. Численный эксперимент в классической гидромеханике турбулентных потоков. Екатеринбург, 2001. 162 с.

Поступила 28.04.2021; принята к публикации 22.06.2021

Информация об авторах

Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, врио ректора, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru, тел. +7(473)-271-52-68

Сысоев Дмитрий Валериевич - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sysoevd@yandex.ru, тел. +7(980)-556-80-13

Сазонова Светлана Анатольевна - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры техносферной и пожарной безопасности, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ss-vrn@mail.ru, тел. +7(930)-410-80-06

CONVERGENCE OF THE COMPUTATIONAL PROCESS WHEN IMPLEMENTING A VARIATIONAL METHOD FOR SOLVING A BOUNDARY VALUE PROBLEM OF HYDRODYNAMICS

D.K. Proskurin, D.V. Sysoev, S.A. Sazonova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we analyze the results of the application of the variational method for solving the boundary value problem of hydrodynamics. From the point of view of the numerical study of problems in mathematical physics, these variational state-

ments are considered as the basis of projection methods (the Ritz method). The problem under consideration is reduced to the study of wave oscillations of the free surface of an ideal incompressible fluid located inside an axisymmetric cavity and subject to the action of a uniform field of mass forces. We present the main techniques that allow one to reduce the consumption of computer time and accelerate the convergence of the computational process when calculating the hydrodynamic characteristics of cavities of various configurations. The use of the Trefftz method makes it possible to reduce the time for calculating the boundary value problem. The transformation allows one to reduce a three-dimensional integral to a one-dimensional one. This creates a universal method for determining the hydrodynamic coefficients for cavities of revolution with an arbitrary contour of the meridian section. However, for most resonator configurations, the convergence rate is satisfactory and provides numerical values with a high degree of accuracy. Taking into account that the Bessel functions give fast convergence but are not complete, and the Legendre polynomials are complete, we implemented the construction of a variational series on the basis of a "mixed" system of functions. This technique allowed us to significantly speed up and improve the convergence process for unfavorable cases when the use of each coordinate function system separately did not lead to success

Key words: hydrodynamics, variational method, wave oscillations, fluid, Trefftz method, Ritz method, cylindrical functions, boundary conditions, Laplace's equation

References

1. Dokuchaev L.V. "On the solution of the boundary value problem of fluid oscillations in conical cavities", *Applied Mathematics and Mechanics (Prikladnaya matematika i mekhanika)*, 1964, vol. 28, no. 1, pp. 151-154.
2. Feshchenko S.F., Lukovskiy I.A., Rabinovich B.I. et al. "Methods for calculating the attached masses of liquid in movable cavities" ("Metody rascheta prisoedinennykh mass zhidkosti v podvizhnykh polostyakh"), Kiev, Nauk. Dumka, 1969, 250 p.
3. Rabinovich B.I. "Introduction to the dynamics of spacecraft launch vehicles" ("Vvedenie v dinamiku raket-nositeley kosmicheskikh apparatov"), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 416 p.
4. Lin B., Chandler-Wilde S.N. "Numerical conformal mapping and mesh generation for polygonal and multiply-connected regions", *J. Hydroinformatic*, 2000, vol. 02, no. 4, pp. 255-267.
5. Dokuchaev L.V., Stazhkov E.M. "Determination of hydrodynamic characteristics of arbitrary cavities of revolution by the variational method", *News of Academy of Sciences of the USSR. Solid Body Mechanics (Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela)*, 1974, no. 3, pp. 44-49.
6. Stazhkov E.M. "Algorithm for the numerical solution of the problem of determining the frequencies and added masses of a fluid when calculating the vibrations of structures with rigid reservoirs", *Research on the Theory of Structures (Issledovaniya po teorii sooruzheniy)*, 1974, vol. 20, pp. 62-73.
7. Lipanov A.M., Kisarov Yu.F., Klyuchnikov I.G. "Numerical experiment in classical hydromechanics of turbulent flows" ("Chislennyy eksperiment v klassicheskoy gidromekhanike turbulentnykh potokov"), Ekaterinburg, 2001, 162 p.

Submitted 28.04.2021; revised 22.06.2021

Information about the authors

Dmitriy K. Proskurin, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru, tel. +7(473)-271-52-68

Dmitriy V. Sysoev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sysoevd@yandex.ru, tel. +7(980)-556-80-13

Svetlana A. Sazonova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ss-vrn@mail.ru, tel. +7(930)-410-80-06

СОЗДАНИЕ АССОЦИАТИВНЫХ КОПИЙ ЭЛЕМЕНТОВ 3D-МОДЕЛЕЙ С ИМПОРТИРУЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

А.Н. Юров, Д.Е. Пачевский, В.В. Сокольников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены подходы по созданию новых элементов программным копированием, образованных от имеющихся 3D-моделей и представленных в экспортных форматах данных. Подготовлена структурная схема для проектирования программ по созданию копий элементов относительно базовых моделей с импортируемой геометрией. Для создания ассоциативных копий импортируемых моделей разработан автономный программный модуль. Программное решение в реализации построения копий выполнено на классах и методах открытого геометрического ядра Open CASCADE, где посредством диалогов, а также с помощью вспомогательных элементов производится построение подобных элементов от имеющихся моделей. Доступны режимы работы, когда копии могут быть получены по направлениям, по окружности относительно точки, масштабированием, зеркальным копированием и прочими подходами к моделированию тел. В проекте имеется возможность расширения функционала для получения ассоциативных копий элементов с использованием массивов данных и импортом параметров, представленных табличным видом. Кроме того, в программном модуле реализованы средства просмотра и представления моделей, а также их копий в отдельном масштабируемом окне, имеется функционал для изменения цвета моделей, удаления выборочной копии объекта, сохранения результатов в открытых экспортных форматах CAD систем. Разработка выполнена с использованием 64-х разрядной архитектуры операционных систем Windows

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

Введение

САПР решения позволяют добиться автоматизации ряда производственных задач. Автономные специализированные модули используют импорт данных для того, чтобы произвести анализ отдельных деталей или узлов, создать управляющие программы для твердотельных моделей, обеспечить подготовку электронной документации, включая цифровые аналоги чертежных документов и спецификаций.

В большинстве случаев при моделировании используется типовой алгоритм создания 3D цифровых макетов изделий: из эскизов, элементы которых заданы размерами (Dimensions) и присутствуют ограничения (Constraints), получают контуры, потом к выделенным контурам применяют операции для получения твердотельных моделей выдавливания (Extrude), вращения (Revolve), по траектории, набором сечений. Есть технологические решения, которые обеспечивают подходы, когда подготовка моделей производится наращиванием элементов на деталь и без использования контуров (синхронная технология). В системах моделирования можно встретить реализацию в создании цифровых макетов, когда

деталь формируется по набору геометрических примитивов: куб, цилиндр, сфера, и последующей комбинацией логических действий в плане конечного формообразования. При этом есть и конструктивные элементы, например: пазы, отверстия, проточки, фаски и скругления. Для последних реализуются специальные диалоговые окна, где указываются параметры для построения элемента в составе твердотельной модели.

Кроме того, в системах моделирования присутствуют средства, позволяющие создать копии уже имеющихся элементов (Associative Copy). Например, корпус детали фланца по контуру, представленной окружностью, может включать несколько сквозных отверстий. Отверстия эффективнее проектировать копированием элементов по окружности, выбрав уже имеющиеся. Для такого копирования достаточно подготовить только одно отверстие – остальные система моделирования выполнит самостоятельно.

Есть и другие приёмы, когда элементы могут быть скопированы. Например, построение отверстий вдоль выбранной грани или по сетке точек на поверхности модели. Кроме того, элементы можно дублировать зеркальным копированием, предварительно задав кон-

структивную плоскость для указанного отображения.

Средствами геометрического ядра Open Cascade [1-3] возможно получение ассоциативных копий элементов всеми вышеперечисленными способами.

Требования при разработке проектов для получения элементов копированием

При разработке автономных программных решений по созданию копий от моделей с

импортируемой геометрией необходимо подготовить развитый графический интерфейс, обеспечивающий ввод достаточного числа параметров для построения требуемых элементов.

Кроме того, необходимы классы, которые обеспечат реализацию в построении ассоциативных копий методами геометрического ядра Open Cascade. На рис. 1 представлена схема проектирования приложения по созданию копий.

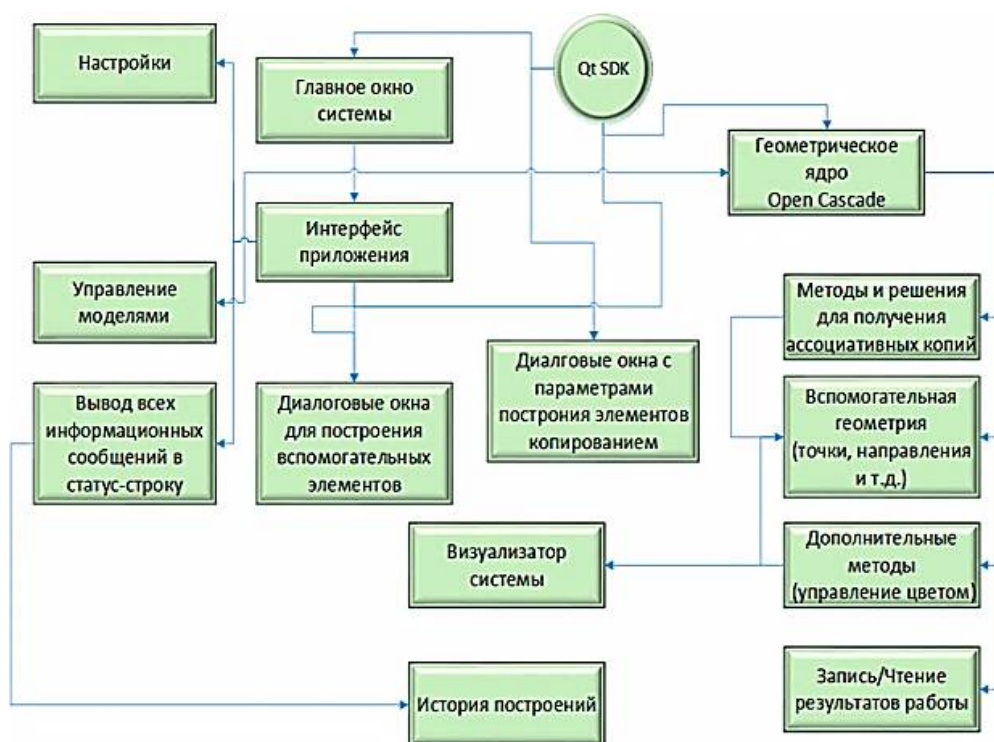


Рис. 1. Схема разработки приложения по созданию ассоциативных копий

Согласно приведенной схеме, программное решение должно состоять из следующего набора компонентов:

- иметь программный интерфейс, состоящий из текстового меню, инструментальных панелей, информационной панели, в которой представлена история всех действий в процессе эксплуатации;

- иметь диалоговый режим работы посредством разработки отдельных не перекрываемых основное окно панелей, в которых определяются конструктивные параметры для создания элементов копированием;

- включать классы и методы геометрического ядра Open Cascade, обеспечивающие создание ассоциативных копий элементов;

- должна быть сделана быстродействующая реализация по отображению копий в главном окне приложения;

- обеспечивать работу с экспортным форматом данных для загрузки моделей и их последующем сохранении.

Пути реализации

Если создание графической части приложения обычно не вызывает затруднений, то функциональная часть модуля требует более детальной проработки. Для получения копий элементов от заданной твердотельной модели необходим набор методов, обеспечивающих построение этих элементов по заданным условиям.

Метод по созданию вспомогательной точки: `void CreatePoint(VisualScreenContext* vision,int x,int y,int z)`. Данный метод необходим для того, чтобы обеспечить построение некоторой точки, относительно которой производится построение того или иного элемента. Точка определяется координатами в пространстве, преобразуется до объекта, который можно передать на сцену, при этом задается цвет и выполняется отображение. На рис. 2 показаны результаты работы метода.

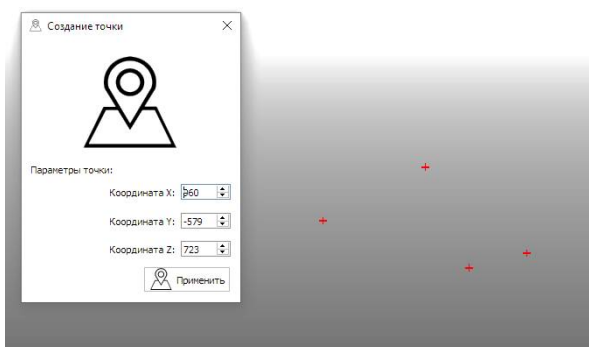


Рис. 2. Построение точек простым вводом и средствами графического интерфейса системы

За создание зеркальных копий отвечает метод, который использует точку как объект, полученный ранее: `void ShapeWithMirrorPoint(VisualScreenContext* vision, TopoDS_Shape shape, TopoDS_Vertex point)`.

Метод позволяет развернуть исходный объект относительно точки. Результаты показаны на рис. 3.

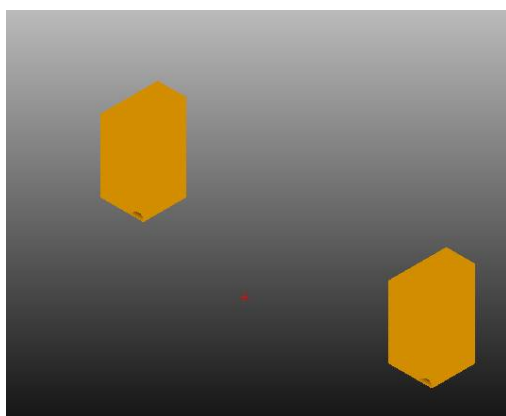


Рис. 3. Построение зеркального объекта

Аналогично работает метод по получению полностью зеркальной копии объекта, когда копируемая модель разворачивается на 180°: `void ShapeWithMirrorPointRound(VisualScreenContext* vision, TopoDS_Shape shape, TopoDS_Vertex point)`.

Метод по получению копий масштабированием, при этом требуется базовая точка и исходный объект, относительно которого будет создана копия: `void ShapeScaleWithPoint(VisualScreenContext* vision, TopoDS_Shape shape, TopoDS_Vertex point,float value)`. Результаты работы показаны на рис. 4.

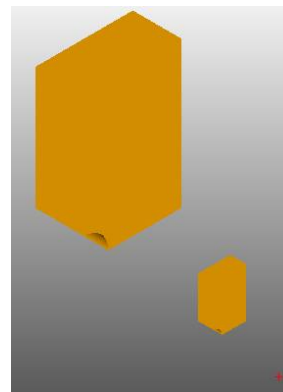


Рис. 4. Построение копии объекта масштабированием

Для методов, которые формируют копии по окружности и в заданном направлении относительно осей системы координат, используются программные конструкции повторений. Указанные методы в качестве параметров содержат количество требуемых копий, кроме того, нужно задать угол поворота или шаг, в зависимости от требуемых действий: `void ShapeWithRotate(VisualScreenContext* vision, TopoDS_Shape shape, TopoDS_Vertex point, gp_Dir dir,int AngleGrad,int number)` и `void ShapeVector(VisualScreenContext* vision, TopoDS_Shape shape, gp_Vec vec,int number,int step)`.

Результаты работы методов показаны на рис. 5 и 6.

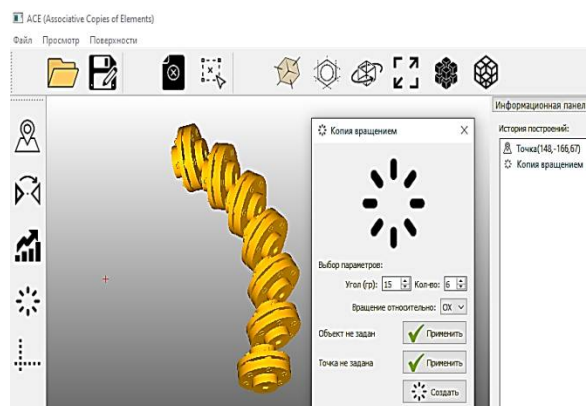


Рис. 5. Построение копии объекта по окружности

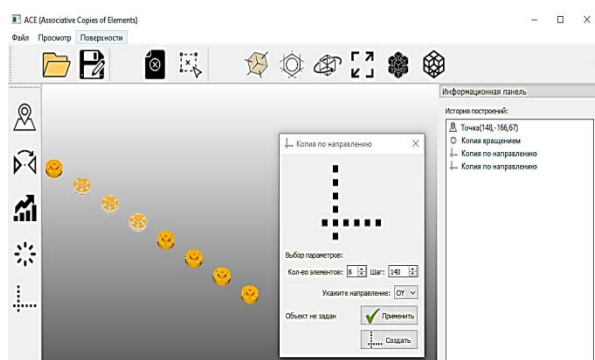


Рис. 6. Построение копии объекта по направлению оси

Выводы

Следует отметить, что сведения из статьи были использованы для реализации автономного программного модуля, построенного на функционале геометрического ядра Open Cascade.

Модуль позволяет получить копии элементов, которые были импортированы в разработанное программное решение. Копирование объектов было полностью реализовано средствами геометрического ядра Open Cascade. Для этого на основе разработанных методик был подготовлен отдельный класс моделирования и интегрирован в программную разработку. Программное решение обладает развитыми средствами по интерактивности в работе с элементами. Выбор данных и параметров осуществляется через отдельно разработанные информационные диалоги, а также при непосредственном выборе объектов в окне приложения. Для проектного решения активно использовалась вспомогательная геометрия, обеспечивающая пути создания копий

относительно следующего набора данных: точки, векторы, оси, направления.

Все объекты, которые были подготовлены в программном решении, могли быть перенесены в экспортном формате в сторонние САПР или же повторно загружены в систему для просмотра.

В разработке выполнена реализация по получению копий в направлении осей, по окружности относительно вспомогательной точки, копия масштабированием выбранного базового объекта, зеркальная копия.

Созданное решение может взаимодействовать посредством экспортных форматов с другими САПР, где получение копий элементов выполняется медленнее или нет тех возможностей, которые включает в себя разработанный модуль.

Литература

1. Еремин И.А., Рьжков 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. Visualization of metalworking processes in the development of simulation programs for equipment with numerical control/ A.N. Yurov, M.I. Chizhov, A.V. Bredikhin, V.V. Lavlinsky// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. p. 32092.
3. Development of autonomous software solutions based on geometric cores to create digital assembly models of machine tools/ A.N. Yurov, M.I. Chizhov, V.V. Vetokhin, V.V. Lavlinsky//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. p. 52063.

Поступила 09.04.2021; принята к публикации 18.06.2021

Информация об авторах

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

Пачевский Денис Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(910)341-80-26

Сокольников Виктор Владимирович – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(904)213-59-44

CREATION OF ASSOCIATIVE COPIES OF ELEMENTS OF 3D MODELS WITH IMPORTED GEOMETRY

A.N. Yurov, D.E. Pachevskiy, V.V. Sokolnikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses approaches to creating new elements by programmatic copying, formed from existing 3D models and presented in export data formats. We made a block diagram for designing programs for creating copies of elements relative to base models with imported geometry. To create associative copies of imported models, we developed an autonomous software module. We performed the software solution in the implementation of building copies on the classes and methods of the open geometric core Open CASCADE, where, through dialogues, as well as with the help of auxiliary elements, similar elements are constructed from existing models. Modes of operation are available when copies can be obtained in directions, along a circle relative to a point, scaling, mirroring and other approaches to modeling bodies. The project has the ability to expand the functionality to obtain associative copies of elements using data arrays and importing parameters presented in a tabular form. In addition, the software module implements tools for viewing and presenting models, as well as their copies in a separate scalable window, there is functionality for changing the color of models, deleting a selective copy of an object, saving results in open export formats of CAD systems. The development was carried out using the 64-bit architecture of Windows operating systems

Key words: CAD modules, imported 3D models, geometric core of Open Cascade

References

1. Eremin I.A., Ryzhkov V.A., Kilina A.A. "Open CASCADE-tool for the development of a computer-aided design system", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no 12.2, pp. 82-85
2. Yurov A.N., Chizhov M.I., Bredikhin A.V., Lavlinsky V.V. "Visualization of metalworking processes in the development of simulation programs for equipment with numerical control", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*, 2020, pp. 32092.
3. Yurov A.N., Chizhov M.I., Vetokhin V.V., Lavlinskiy V.V. "Development of autonomous software solutions based on geometric cores to create digital assembly models of machine tools", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*, 2020, pp. 52063.

Submitted 09.04.2021; revised 18.06.2021

Information about the authors

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

Denis E. Pachevskiy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel.: +7 (910) 341-80-26

Viktor V. Sokolnikov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel.: +7 (904) 213-59-44

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ ОНЛАЙН НА ОСНОВЕ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА

С.А. Коваленко, Н.И. Гребенникова, В.А. Малиновкин, П.С. Скочко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: использование новейших технических разработок на базе созданных электронных платформ позволяет организовать качественное онлайн-образование. Сформулированы требования к разрабатываемой платформе обучения, такие как возможность создавать и редактировать курсы, возможность прикреплять методические материалы разных расширений и медиафайлы к курсу, возможность создавать и редактировать лекции / тесты в рамках курса, возможность проведения видеоконференций в рамках курса, возможность просмотра полной статистики результатов тестирования по курсу для преподавателей и её выгрузка, возможность двунаправленного общения преподавателя с обучающимися через чат. Созданное приложение реализует компетентностный подход. Включает рассмотрение структурной схемы курса. Сущность «Курс» может состоять из секций, которые, в свою очередь, могут состоять из подсекций (лекции, тесты, видеоконференция). Курс включает в себя всю информацию секций для обучения в рамках определенных компетенций. Представлена схема управления правами со стороны преподавателя. Рассмотрены жизненный цикл курса, интерфейс его создания и алгоритм прохождения курса, что дает полное представление о функциональных возможностях и особенностях работы программного обеспечения на созданной электронной платформе

Ключевые слова: электронная платформа, лекция, тест, видеоконференция, компетенция, курс, прокторинг

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется хранению различного рода информации с предоставлением быстрого доступа к ней. Это может быть хранение не только отдельных файлов данных, но и взаимосвязанных структур, содержащих системы и подсистемы, управление которых становится нетривиальной задачей. В настоящее время актуальны проблемы, связанные с хранением обучающего материала, который используют не только для очного, но и для дистанционного обучения [1], а также с управлением процесса обучения и отчетностью проведённой работы.

Ранее авторами был проведен сравнительный анализ функциональных возможностей популярных платформ для систем управления обучением. В публикации рассматривались следующие платформы [2]: Moodle [3], iSpring Learn [4], Google Classroom [5]. В ходе анализа были выделены преимущества и недостатки платформ. Среди недостатков особо выделяются:

- отсутствие встроенного редактора курса;
- отсутствие встроенного модуля конференцсвязи;
- отсутствие быстрой развёртки системы.

На основании этих выводов были сформулированы требования к разрабатываемой платформе. Необходимо учесть, что курс направлен на формирование компетенций, поэтому требуется реализовать компетентностный подход [5] и обеспечить возможность:

- создавать и редактировать курсы;
- прикреплять методические материалы разных расширений курсу;
- создавать и редактировать лекции / тесты в рамках курса;
- создавать тесты разных уровней: для лекции, темы (секции), курса и компетенции;
- проведения видеоконференций в рамках курса;
- просмотра полной статистики результатов тестирования / курса для преподавателей и её выгрузка;
- просмотра урезанной (не полной) версии статистики результатов тестирования / курса для студентов и её выгрузка;
- двунаправленного общения преподавателя с учениками через чат.

Ключевой сущностью в рамках данной платформы является сущность «Курс», структурная схема которого представлена на рис. 1.

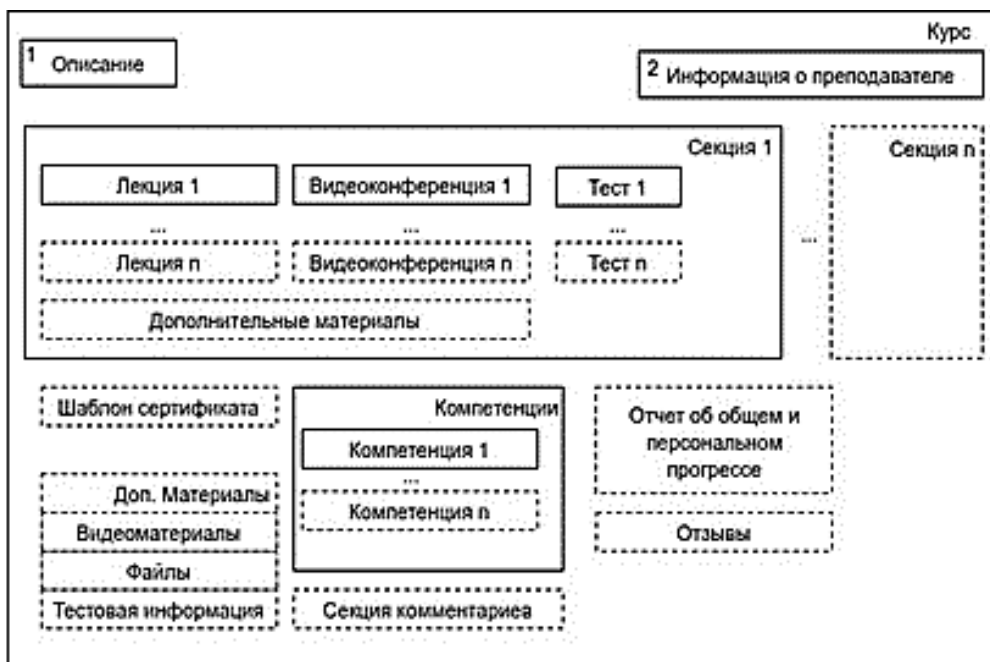


Рис. 1. Структурная схема курса

Сущность «Курс» агрегирует информацию для обучения в рамках определенных компетенций. Сущность «Секция» представляет собой тему изучаемой компетенции/предмета, что позволяет представить изучаемый материал структурированно. В случае необходимости доступ к материалам следующей секции может быть ограничен и получен только при изучении и прохождении всех тестов предыдущей секции. В случае, если необходимости разделять материал курса на темы нет, то следует размещать все материалы в рамках одной секции.

Сущность «Лекция» представляет собой набор текстовых и медиа материалов во встроенном редакторе.

«Видеоконференция» - событие с указанной датой, в рамках проведения конференции преподаватель может:

- демонстрировать экран, а также управлять доступом к этой функции у пользователей;
- ограничивать доступ на отправку сообщений и дополнительных файлов в чатах;
- наделять пользователей правами модератора (управление доступами для пользователей в чате);
- в рамках проведения видеоконференции включить запись экрана. После её окончания и обработки видеозапись будет доступна вместе с чатом и материалами, отправленными в ходе проведения видеосвязи.

Сущность «Тест» представляет собой набор вопросов, формируемых автоматически

на основе компетенций той сущности, для которой тест был сформирован. Изначально для компетенции формируется список вопросов, ответы на которые могут быть представлены в виде выбора вариантов, выбора нескольких вариантов, ввода ответа. Схема формирования теста представлена на рис. 2.

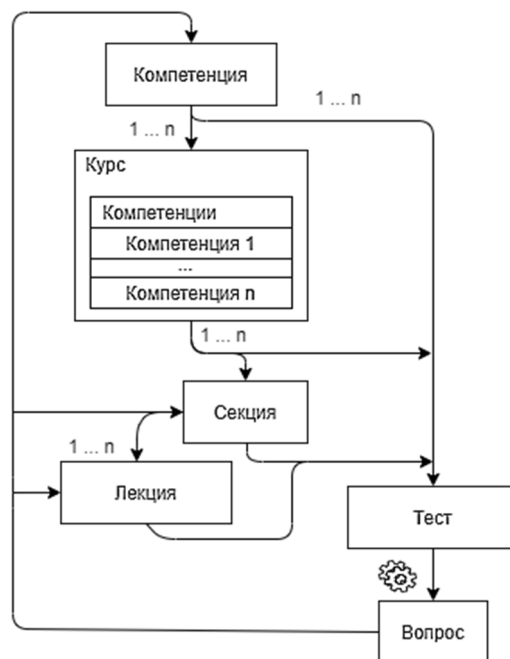


Рис. 2. Схема формирования теста

При создании курса выбираются компетенции, отражающие знания, которые будут

получены в результате изучения курса. При создании курса необходимо выбрать ряд компетенций. При добавлении какой-либо подсеции необходимо выбрать ряд компетенций, которые покрывают данную секцию. Одну из компетенций курса можно связать с добавленной лекцией. В дальнейшем в созданном тесте существует возможность установления связи с лекцией, секцией, курсом. Также тестирование можно сформировать вне курса для компетенций. Для каждого пользователя тест будет сформирован на основе списка вопросов по выбранным компетенциям (если тест создан для курса в целом, то вопросы к нему будут формироваться на основе перечня вопросов по его компетенциям, если на основе секции, то тест будет формироваться на основе компетенций подсеций, если на основе подсеций, то тест будет включать в себя только вопросы соответствующей компетенции). Данный механизм является реализацией одного из элементов прокторинга [6], позволяющий производить контроль за процессом сдачи теста.

Схема управления правами со стороны преподавателя представлена на рис. 3.

Из представленной схемы видно, что преподаватель имеет возможность контролировать почти весь процесс коммуникации со студентами. Такая особенность поможет качественно выстроить процесс обучения, улучшит контроль за самостоятельностью проведения работы. Администратор имеет те же права как

относительно обучающихся, так и относительно преподавателей.



Рис. 3. Схема управления правами со стороны преподавателя

На рис. 4 представлена схема жизненного цикла курса.

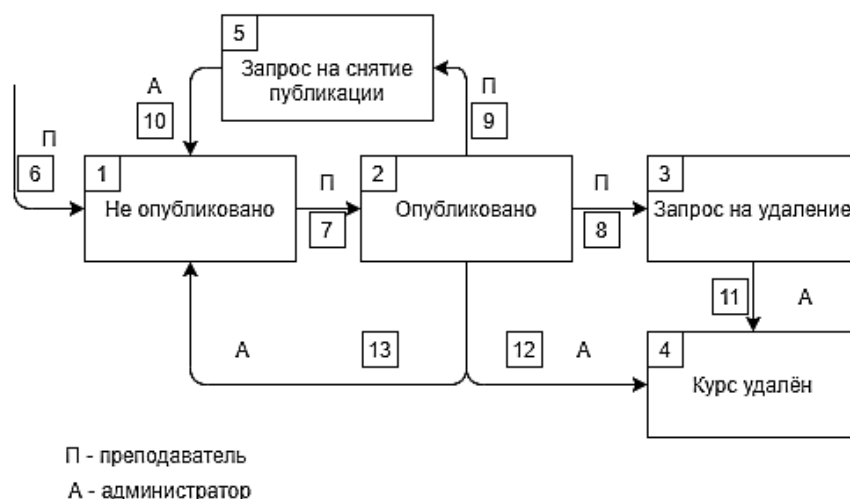


Рис. 4. Жизненный цикл курса

Блоки 1 – 5 являются статусами данной сущности, характеризующие его состояние. Векторы 6 – 13 описывают процессы смены статусов. Из данной схемы видно, что состоя-

нием курса может управлять как администратор, так и преподаватель. Важно отметить, что такие переходы, как «Опубликовано», «Не опубликовано» - «Опубликовано» - «Курс уда-

лён» со стороны преподавателя осуществляется путём запроса через администратора. Таким образом, управление конечными состояниями доступно только админу, что даёт возможность контролировать жизненный цикл в случае недобросовестного контента.

Интерфейс создания курса представлен на рис. 5.

При создании курса преподаватель может добавить изображение, которое будет отображаться при его выборе и рассмотрении. При

составлении описания существует возможность редактирования стилистики, текста и изменения его ориентации. Также в текст можно добавлять таблицы, гиперссылки, пояснительные изображения. Интерфейс создания курса имеет простую структуру, что минимизирует временные затраты на изучение функционала данной страницы и создание объекта в целом.

Схема алгоритма прохождения курса представлена на рис. 6.

Создание курса

The screenshot displays the course creation interface. At the top left, there is a small thumbnail of the course card. The main form includes the following sections:

- Название курса:** Тестовый курс
- Описание курса:** A rich text editor with a toolbar containing icons for code blocks, bold, italic, underline, strikethrough, link, unlink, font color, background color, bulleted list, numbered list, indent, outdent, table, image, video, and audio. The text area contains "Описание тестового курса".
- Направление:** СУНЦ МГУ
- Дата начала:** 3/10/2021
- Сроки обучения:** (empty)
- Дата окончания:** (empty)
- Курс-конкурс:**
- Предмет:** Компьютерная графика
- Уровень доступа:** Публичный
- Длительность, ч:** 0
- Количество видеоуроков:** 0
- Компетенции:** Информационные технологии
- Уровень сложности:** Средний
- Язык:** Русский
- Цена:** 0

Структура: A section for adding course sections. It shows "Первый раздел" and a "Добавить раздел" button. On the right, there are icons for "Тест", "Лекция", and "Вебинар", along with edit, delete, and add icons.

A "Сохранить" button is located at the bottom right of the form.

Рис. 5. Интерфейс создания курса

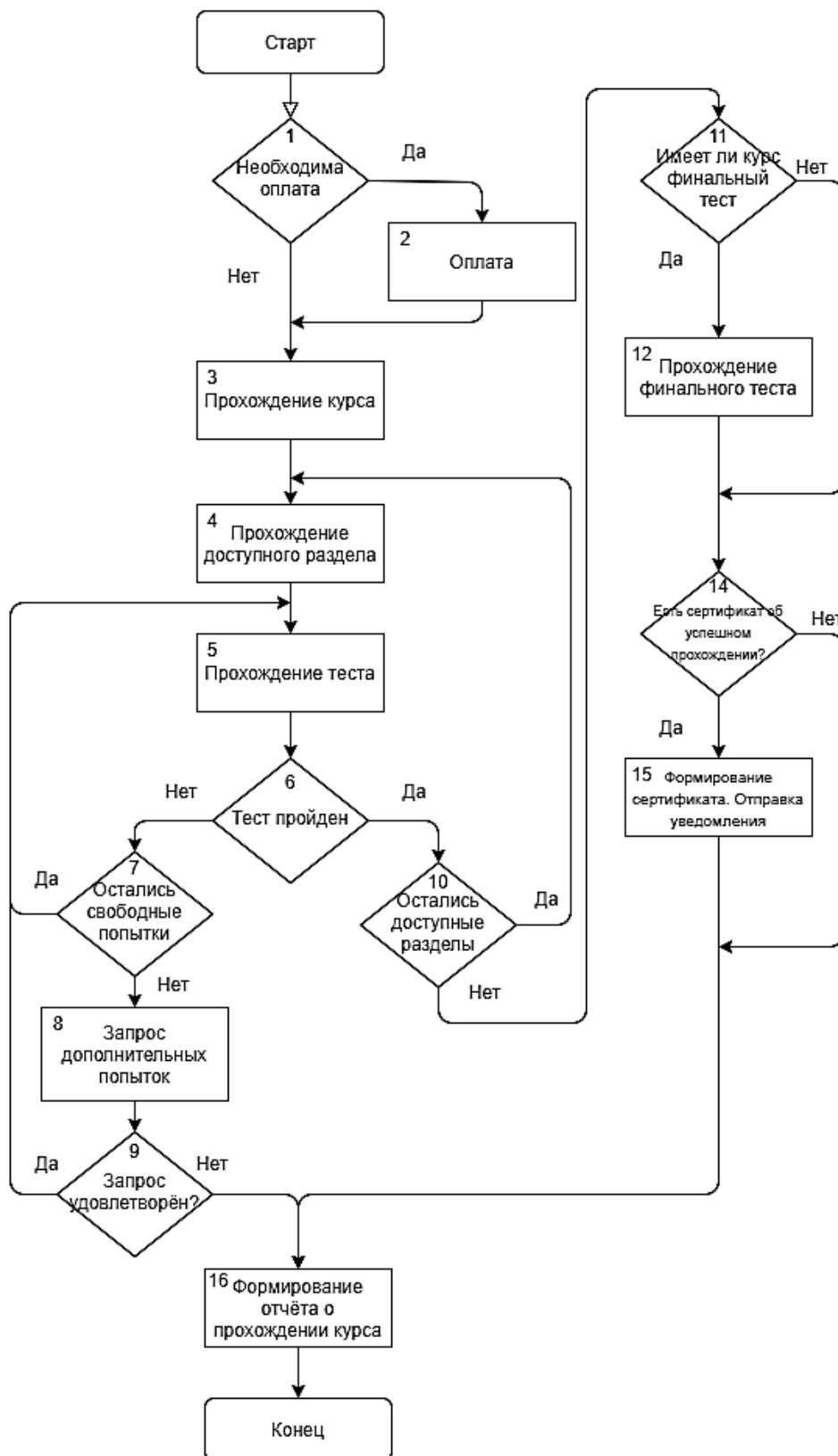


Рис. 6. Схема алгоритма прохождения курса

Блоки 1, 6, 7, 9, 10, 11, 14 являются разветвлениями процесса прохождения курса. Остальные блоки представляют собой действия, которые учащийся совершает при его

прохождении. По данной схеме студент может пройти все доступные разделы, выполнив соответствующие тесты. Из алгоритма видно, что при фиксированном количестве попыток, кото-

рые отводятся для прохождения теста, преподаватель может назначить дополнительные попытки. По завершению курса формируется отчёт, который доступен как преподавателю, так и обучающемуся.

Заключение

В данной статье был представлен функционал разработанного приложения дистанционного обучения, выполненный с учётом поставленных требований. Платформа включает в себя редактор курсов, лекций, тестов, возможность организовать видеоконференцию, двустороннюю коммуникацию между обучающимися и преподавателем в виде чата, просмотр и выгрузки статистики. Кроме этого web-приложение обладает быстрой развёрткой для любого доступного программного обеспечения.

«Курс» - главная сущность, которая агрегирует информацию с секций и подсекций (лекции, тесты, видеоконференции). Создание курса реализует компетентностный подход. Также был продемонстрирован интерфейс по созданию курса, который имеет простую структуру, что минимизирует временные затраты на изучение функционала данной страницы и создание объекта в целом.

Обучающийся по какой-либо программе должен будет изучить все разделы, которые включает в себя курс. Чтобы завершить прохождение, необходимо пройти соответствующие тесты. Информация о прохождении программы будет доступна как студенту, так и преподавателю при его завершении.

Преподаватель имеет возможность не только организовывать, но и контролировать процесс обучения. В данном приложении создатель курса обучения обладает рядом прав, с помощью которых возможно контролировать почти весь процесс коммуникации со студентами. Такая особенность поможет качественно выстроить процесс обучения, улучшит контроль за самостоятельностью проведения работы.

Литература

1. Полат Е.С., Моисеева М.И., Петров А.Е. Педагогические технологии дистанционного обучения: учеб. пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2006.
2. Сравнительный анализ популярных платформ для систем управления обучением/ С.А. Коваленко, А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова, В.А. Малиновкин //Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 6. С. 15-18.
3. Система электронного обучения Moodle: обзор возможностей и функционала. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://lmslist.ru/free-sdo/obzor-moodle/>.
4. Обзор СДО iSpring Learn: возможности и решаемые бизнес-задачи [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://lmslist.ru/sdo/obzor-ispring-online/>.
5. Google Classroom: функционал и краткая инструкция по созданию онлайн-курса [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.eduneo.ru/google-classroom/>.
6. Бакурадзе А.Б. Управление развитием образовательного учреждения (по материалам проектов «Концепция комплексного сопровождения развития ребенка в образовательном процессе», «Система многоуровневой оценки учебной деятельности учащихся» и «Технология системно-деятельностной формы организации диагностики и качества обучения»). М.: АПКИПРО, 2004. 34 с.
7. Что такое прокторинг и чем полезен на экзаменах, тестировании и в обучении [Электронный ресурс]. URL: <https://finacademy.net/materials/article/proctoring>

Поступила 15.03.2021; принята к публикации 22.06.2021

Информация об авторах

Коваленко Сергей Александрович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sergpc@yandex.ru
Гребенникова Наталия Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: g-naty@yandex.ru
Малиновкин Владислав Алексеевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: malinovkin@mail.ru
Скочко Павел Сергеевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sko4ko.pavel@gmail.com

DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC PLATFORM FOR ORGANIZING ONLINE EDUCATION WITH A COMPETENCE-BASED APPROACH

S.A. Kovalenko, N.I. Grebennikova, V.A. Malinovkin, P.S. Skochko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the use of the latest technical developments based on the created electronic platforms allows one to organize high-quality online education. In this article, we formulated the requirements for the developed training platform such as: the ability to create and edit courses, the ability to attach methodological materials of various extensions and media files to the course, the ability to create and edit lectures/tests within the course, the ability to conduct video conferences within the course, the ability to view full statistics of test results for the course for teachers and download it, the ability of bidirectional communication between the teacher and students via chat. The created application implements a competence-based approach. The article includes a review of the structural scheme of the course. The "Course" entity can consist of sections, which in turn can consist of subsections (lectures, tests, video conferences). The course includes all the information of the sections for training within certain competencies. The teacher's rights management scheme is also presented. We considered the life cycle of the course, the interface for its creation and the algorithm for passing the course, which gives a complete picture of the functionality and features of the software on the created electronic platform

Key words: electronic platform, lecture, test, video conference, competence, course, proctoring

References

1. Polat E.S., Moiseev M.I., Petrov A.E. "Educational technology of distance learning" ("Pedagogicheskie tekhnologii distantsionnogo obucheniya"), Moscow, Akademiya, 2006.
2. Kovalenko S.A., Barabanov A.V., Grebennikov N.I., Malinovskiy V.A. "Comparative analysis of the popular platforms for learning management systems", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 6, pp. 15-18.
3. "E-learning system Moodle: an overview of features and functionality", available at: <https://lmslist.ru/free-sdo/obzor-moodle>.
4. "Review of the iSpring Learn SDO: opportunities and solved business problems", available at: <https://lmslist.ru/sdo/obzor-ispring-online/>.
5. "Google Classroom: functionality and quick instructions for creating an online course", available at: <https://www.edunee.ru/google-classroom/>.
6. Bakuradze A.B. "Management of the development of an educational institution" ("Upravlenie razvitiem obrazovatel'nogo uchrezhdeniya") (based on the materials of the projects "The concept of integrated support for the development of a child in the educational process", "The system of multi-level evaluation of students' educational activities" and "Technology of the system-activity form of organizing diagnostics and quality of education"), Moscow, APKiPRO, 2004, 34 p.
7. "What is proctoring and what is useful in exams, testing and training", available at: <https://finacademy.net/materials/article/proktoring>

Submitted 15.03.2021; revised 22.06.2021

Information about the authors

Sergey A. Kovalenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sergpc@yandex.ru

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

Vladislav A. Malinovkin, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: malinovkin@mail.ru

Pavel S. Skochko, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sko4ko.pavel@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ НЕДВОИЧНЫХ СИСТЕМ СЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

М.Д. Новичков, Д.А. Орлов

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

Аннотация: целью данной работы является нахождение способа повышения эффективности вычисления элементарных функций, когда критериями оценки эффективности являются быстродействие (зависящее от сложности алгоритмов, тактовой частоты процессора и степени распараллеливания) и требуемого для организации вычислений объема оборудования. Для множества расчётов в науке и промышленности необходимо применение высокоточных вычислений. Однако при использовании методов, ориентированных на позиционную двоичную систему счисления, время осуществления вычислений довольно велико. В рамках данного исследования приведён обзор наиболее известных традиционных методов вычисления с повышенной точностью, изучены существующие решения с использованием недвоичных систем счисления. В частности, были описаны с преимуществами и недостатками такие системы счисления, как разрядно-логарифмическая, знакоразрядная система счисления и многомодульная система остаточных классов. Особое внимание было уделено системе остаточных классов, непозиционной системе счисления, которой присущ внутренний естественный параллелизм. После рассмотрения методов численного решения элементарных функций был разработан алгоритм ускоренного извлечения квадратного корня в системе остаточных классов. Данный алгоритм сформулирован на основе одного из методов, которые были проанализированы в ходе исследования, и может быть реализован как программный модуль, однако будет наиболее эффективен, будучи реализованным в виде электронной схемы на кристалле. Приведены описания условий, которые нужно учитывать в ходе аппаратной реализации алгоритма. Эти примечания содержат рекомендации по синтезу структуры устройства, принимая во внимание физические особенности распространения информационных сигналов в электронных комбинационных логических схемах

Ключевые слова: недвоичные системы счисления, высокоточные вычисления, модулярная арифметика, система остаточных классов, элементарные функции, извлечение квадратного корня

Введение

Одной из актуальных проблем в организации вычислений является повышение быстродействия высокоточных вычислений. При создании средств для решения прикладных задач разработчикам приходится оптимизировать вычислительный процесс с учётом требований и имеющихся ресурсов. Эффективность решения зависит как от архитектуры вычислительной системы, так и от того, насколько хорошо будут использованы особенности аппаратной части при написании программного кода. К сожалению, при повышении точности обработки числовых данных быстродействие операций над ними будет значительно снижено.

Для большинства обычных задач достаточно точности данных, представленных в формате с плавающей точкой в соответствии со стандартом IEEE-754 [1]. Однако некоторые задачи требуют более высокой точности для получения корректных результатов, а также можно получить некую дополнительную выгоду пропорционально повышению точности вычислений. Такие задачи могут относиться к об-

ласти научных исследований (математическая физика, динамические системы, экспериментальная математика), моделирования сложных и масштабных явлений (например, моделирование климата или состояния атмосфер звёзд) [2], расчётов в САПР (создание аккумуляторов, турбомашиностроение и задачи аэроупругости) или геометрического моделирования.

Высокое быстродействие же чаще всего необходимо в области автоматизированного управления процессами, в частности, в таких системах реального времени, как системы автоматического управления воздушного судна (САУ ВС) или автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП).

Традиционно принято для организации высокоточных вычислений использовать специальные программные пакеты. Ставшие уже стандартными ARPREC, MPFUN90 и подобные имеют своим недостатком значительное увеличение времени вычислений. Одни из них основаны на методах, позволяющих вычислять результат с произвольной точностью, а другие могут помочь избежать ошибочных решений при наличии весомой погрешности. К первым можно отнести арифметику длинных чисел и

символьных вычислений, а ко второй категории относятся интервальные вычисления.

Для ускорения высокоточных вычислений обычно используют вычислительные системы с большим количеством вычислительных узлов (многопроцессорные или многомашинные вычислительные системы). Очень эффективным считается распараллеливание на уровне команд [2]. Однако построение подобных систем требует огромных затрат ресурсов. При этом есть задачи, для которых их использование всё равно не будет эффективным в достаточной мере.

С целью улучшить ситуацию с быстродействием обработки больших чисел были разработаны программные решения, использующие системы счисления, которые не являются двоичными. Самой перспективной можно с уверенностью считать систему остаточных классов, также называемой «модулярной арифметикой».

Многие исследователи других систем счисления в итоге приходили к использованию модулярной арифметики, пытаясь построить гибридную систему счисления, чтобы с помощью, например, свойств логарифмической или интервальной арифметики, ослабить влияние недостатков системы остаточных классов (СОК) на быстродействие при вычислении сложных функций. К примеру, в работе [3] было получено ускорение, но всё-таки решение остаётся программным, а следовательно, имеет ограничения быстродействия.

Аппаратная поддержка высокоточных вычислений в стандартных процессорах общего назначения на данный момент отсутствует. Разработка достаточно быстродействующих методов выполнения не модульных, сложных операций в СОК позволит расширить область применения подобных схемных решений. В данной работе рассматриваются возможности совершенствования методов вычисления в СОК для их аппаратной реализации. Для этого в статье предложен подход к ускорению немодулярных операций в СОК. На основе предложенного подхода разработан алгоритм вычисления квадратного корня из числа, представленного в СОК.

Стандартные методы повышения точности вычислений

В настоящее время в большинстве стандартных средств организации высокоточных вычислений используются следующие методы:

- 1) Арифметика длинных позиционных чисел (длинная арифметика).
- 2) Интервальные вычисления.
- 3) Символьные вычисления (компьютерная алгебра).
- 4) Постбинарные вычисления.

В большинстве распространённых процессоров общего назначения в настоящее время аппаратно реализована только работа с 32 и 64 битными числами. Аппаратная реализация работы с числами в 128 и более разрядов существует лишь для отдельных архитектур (например, в микропроцессорной архитектуре Cell).

1. Длинная арифметика

Основной способ повышения точности вычислений – это создание специальной структуры данных, представляющей величины с большей разрядностью, и программных процедур, реализующих арифметические операции над ними.

Чаще всего под высокоточными вычислениями понимают способы снизить влияние недостатков представления вещественных двоичных чисел в формате с плавающей точкой, где величина представляется парой значений – мантиссой и порядком.

Основная сущность данного метода заключается в представлении множества разрядов мантиссы в виде набора блоков, то есть в виде ряда чисел меньшей разрядности (длины), рассматриваемого как одно единое длинное число. В различных реализациях для такого представления используют такие структуры, как, например, список (связный или двусвязный) или динамический массив.

Порядок и знак числа в данном случае рассматриваются как отдельные переменные. Однако, например, в пакете QD часть мантиссы и порядка (экспоненты) представляется одним машинным числом, а другая часть – другим.

Для чисел подобной размерности существуют специальные быстродействующие алгоритмы выполнения арифметических операций. Так, например, умножение может быть выполнено с помощью алгоритма Карацубы [4] или алгоритма Фюрера [5], а деление – алгоритмом Бурникеля-Циглера [6]. Однако более эффективным на практике является алгоритм Барретта [7]. Для вычисления НОД (наибольшего общего делителя) самым быстрым является алгоритм Джебелеана–Вебера–Седжелмаса [8].

Основным недостатком длинной арифметики позиционных чисел является сильное вы-

раженное влияние разрядности чисел на скорость выполнения вычислений, при этом возможность распараллеливания алгоритмов выполнения арифметических действий над такими числами ограничена. Это связано со свойствами обработки взвешенных числовых разрядов. Чем больше разрядность (точность) чисел, тем большее количество итераций потребуется сделать при сложении. Также во время вычисления может быть необходимость округления или нормализации мантиссы.

Таким образом, из-за необходимости обработки переносов скорость вычислений резко снижается с увеличением разрядности. По оценкам, приведённым в работе [9], быстродействие вычислений с четверной точностью (128 разрядов) примерно в пять раз ниже, чем с двойной из стандарта IEEE-754, а с восьмерной – в 25-50 раз меньше.

2. Интервальные вычисления

Сущность данного метода заключается в замене вещественного точного значения на множество интервалов, в которых находится само неизвестное значение. Исходные данные и промежуточные результаты представляются граничными значениями, над которыми и производятся все операции. Сами операции при этом определяются так, что результат соответствующей точной операции оказывается внутри вычисленных границ [10].

Погрешность расчёта границ корректируется с помощью направленных округлений. Таким образом, левая граница округляется до ближайшего числа с недостатком в меньшую сторону, а правая граница – с избытком.

Известные реализации – PASCAL-XSC в качестве расширения языка PASCAL и расширение MPFI для библиотеки MPFR (на языке Си).

Таким образом, для интервальных вычислений количество арифметических операций возрастает минимум вдвое по сравнению с обычными вычислениями с плавающей точкой. При этом обеспечивается надёжная оценка погрешности, в том смысле, что точное значение вычисляемого выражения всегда содержится в полученном интервале.

Однако, поскольку интервал представляет собой оценку погрешности вычислений для наихудшего случая, в некоторых случаях возможен неоправданно высокий рост длины интервала, таким образом, интервальные оценки

результатов могут оказываться неинформативными.

3. Символьные вычисления

Данный метод, называемый также «компьютерной алгеброй», представляет собой аналитические преобразования математических выражений, работая с математическими формулами как с последовательностью символов.

Известные реализации – программные пакеты Maple, Mathcad, MATLAB и Sage.

Алкивиадис Акритас, американский математик греческого происхождения, писал в своей книге [11], что компьютерная алгебра отличается от численного анализа тем, что имеет дело с точными числами и алгебраическими выражениями в их символьном представлении, в то время как в численных методах упор делается на снижение погрешности, возникающей при выполнении некоторых алгоритмов с использованием стандартной арифметики с плавающей точкой одинарной или двойной точности.

Алгоритмы работы систем компьютерной алгебры активно используют алгоритмы для разложения на множители, вычисления наибольших общих делителей и получения вещественных корней полиномов.

В численном анализе вещественные числа аппроксимируются числами с плавающей точкой, что приводит к неточностям, но повышает быстродействие. Символьные же вычисления имеют дело в основном с целыми и рациональными числами произвольной точности, употребляя соответствующие структуры данных. Таким образом, в вычислениях полностью исключаются ошибки округления, но ценой значительного снижения производительности.

В основном символьные вычисления применяются для получения решения задач в аналитическом (общем) виде. Чтобы работать с целыми числами произвольной точности, они представляются в виде списков. Рациональные числа представляются аналогично – ссылочными структурами.

4. Постбинарные вычисления

Эти вычисления представляют собой комбинацию позиционных многоразрядных форматов данных, символьных и интервальных вычислений [12].

В структуру числа с плавающей точкой к паре мантиссы и порядка добавляется поле

идентификатора. Это поле состоит из кода и модификатора формата. Идентификаторы формата определяют разрядность и форму представления чисел в диапазоне от 16 разрядов до произвольно большой разрядности.

Данный метод позволяет иметь два вида форматов – обычный и парный. В парном формате значения представляются парой обычных значений, интерпретируемые либо как обыкновенные дроби, либо как границы интервалов. Универсальное представление требует усложнённых алгоритмов, что приводит к дополнительному снижению скорости вычислений.

Применение недвоичных систем счисления для высокоточных вычислений

В ходе теоретического исследования были рассмотрены следующие системы счисления:

- 1) Разрядно-логарифмическая система счисления.
- 2) Знакоразрядная система счисления.
- 3) Система остаточных классов (модулярная арифметика).

1. Разрядно-логарифмическая система счисления

Улучшение операционных характеристик при высокоточных вычислениях реализуется при применении разрядно-логарифмической системы счисления – нетрадиционной позиционной системы счисления с использованием свойств логарифмов.

Разрядно-логарифмическим (РЛ) представлением (кодированием) данных называют изображение двоичного операнда в виде набора двоичных кодов ненулевых разрядов Nx_i того же операнда, каждый из которых определяется как результат вычисления логарифма от веса этого разряда.

Наиболее удобной для использования разрядно-логарифмического изображения с практической точки зрения является структура, в которой для числа будет указан знак этого числа, количество значащих единиц и набор разрядно-логарифмических кодов. Такое представление позволяет работать с гораздо более широким диапазоном чисел, чем в стандартной двоичной. Точность вычислений в данном случае зависит от количества значащих единиц в структуре.

Гамаюн В.П., Коврижкин И.О., предложившие использовать данную систему счисления, в своей публикации [13] не рассматривали

конкретные алгоритмы выполнения операций и не давали оценку скорости таких вычислений. Разрядно-логарифмическое представление позволяет свести мультипликативные операции к реализации операции сложения-вычитания. Произведение двух чисел при РЛ представлении реализуется как процедура поэлементного сложения двух векторов [14].

Для выполнения операции сдвига влево нужно увеличить на заданное значение позиции каждого ненулевого разряда представления числа, а сдвиг вправо можно осуществить уменьшением тех же значений. Это отражает одно из основных свойств разрядно-логарифмического представления - обработка без перемещения в пространстве памяти разрядов.

Организация обработки данных в РЛ представлении основана на применении алгоритмов целочисленной арифметики. Впервые использовалась по предложению двух учёных Николаса Кингсбери и Питера Рейнера для цифровой обработки сигналов в 1971 году [15]. Математические основы же принадлежат Карлу Фридриху Гауссу.

Были попытки развивать данную тематику. Например, А.С. Коржавина, в работе которой рассмотрена реализация логарифмической интервальной арифметики и произведено сравнение с позиционной интервальной арифметикой [16].

2. Знакоразрядная система счисления

В отличие от двоичной системы счисления, в которой представление любого числа однозначно, а все арифметические и логические операции над данными производятся только при их полноразрядном представлении, в знакоразрядной системе счисления имеется ряд преимуществ:

— локальное распространение переносов при выполнении арифметических операций (сигнал переноса при выполнении операции сложения распространяется не далее соседнего разряда), а операция сложения может быть распараллелена так, что при достаточном количестве исполнительных устройств время её выполнения не будет зависеть от разрядности операндов [17];

— возможность организации обработки числовых данных от старших разрядов к младшим;

— наращиваемость разрядности вычислений и, соответственно, точности результатов вне зависимости от разрядности вычислительного средства и др.

Также немаловажным достоинством данного метода является возможность выполнять сквозную поразрядную конвейеризацию процессов получения цифровых данных, их обработки и формирования результата [18].

Однако, несмотря на физическое ускорение выполнения сложения, умножение чисел в данной системе всё так же, как и в стандартной двоичной, требует большого количества итераций. Также автор работы [18] утверждает, что в результате его вычислительного эксперимента выяснилось, что скорость применённого им метода из его другой работы [19] не зависит от выбора между традиционной двоичной и знакоразрядной систем счисления. Данный метод представляет собой алгоритм вычисления полиномов в параллельной структуре с одновременной поразрядной обработкой их коэффициентов, представленных в виде «битовых срезов». Эксперимент показал, что в обеих арифметиках итерационные затраты при одинаковой точности очень близки при любых разрядностях представления членов полинома и их количестве. Но абсолютная погрешность оказалась ниже в знакоразрядной.

3. Система остаточных классов

Под системой остаточных классов (СОК) понимают такую систему счисления, в которой число A представляется набором остатков a_1, a_2, \dots, a_n от деления на группу положительных целых взаимно простых чисел p_1, p_2, \dots, p_n , называемых модулями или основаниями системы. Также данную систему в технической литературе в контексте применения называют «модулярная арифметика».

Значительный вклад в развитие методов вычислений в системе остаточных классов и построению вычислительных устройств, реализующих данную арифметику, сделали российские учёные И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий. В их книге [20] собраны достижения в области исследований вычислений в системе остаточных классов и особенности их реализации. Методы перевода в остаточную форму и обратно в позиционную, работы с отрицательными числами, обнаружения и корректирования ошибок. Описаны алгоритмы выполнения всех базовых 4-х арифметических операций. Кроме того,

здесь описана организация вычислений в комплексной области чисел.

Достоинствами системы остаточных классов является простота и высокая скорость выполнения модульных операций, таких как сложение, вычитание и умножение.

Такие операции, как деление, сравнение и др., требующие информации о величине всего числа, в СОК выполняются по более сложным алгоритмам. И в этом заключается существенный недостаток данной системы счисления, сдерживающий ее широкое применение в качестве компьютерной арифметики. В настоящее время СОК находит применение в задачах, при решении которых количество немодулярных операций (деление, сравнение) сведено к минимуму, а именно: помехоустойчивое кодирование, криптография, цифровая обработка сигналов и т.п. [17].

В работе зарубежных специалистов по численным методам [21] предлагается использовать СОК для представления рациональных чисел и работать с ними без вычислительных погрешностей и ошибок округления. Для однозначного представления рациональных чисел в СОК используются дроби Фарей. Дробь Фарей представляет собой несократимую дробь, числитель и знаменатель которой удовлетворяет следующим условиям:

$$0 \leq a \leq N, 0 \leq b \leq N, (a, b) = 1, \quad (1)$$

где a - числитель, N - порядок дроби Фарей, b - знаменатель.

Диапазону представления чисел в одномодульной системе соответствует множество дробей Фарей – обыкновенных дробей, числитель и знаменатель которых по абсолютной величине не больше натурального числа N (порядка дроби). Но так как при вычислениях значение порядка дроби Фарей может иметь резкий рост, то при итерационных вычислениях периодически необходимо округлять результат вычислений. Такой метод вычислений можно определить как «вычисления с отложенным округлением».

Из современных российских учёных в данной тематике достигли успехов Н.И. Червяков и Ш.А. Оцоков [22]. Червяков имеет множество патентов изобретений, использующих вычисления в системе остаточных классов. В частности, наиболее интересным является устройство деления [23], рассмотренное и получившее модификации в работе [24].

Одной из особенностей, рассмотренных в работе [23], является введение в использование

«относительной величины», значения, вычисляемого по представлению числа в СОК и отображаемого отношение этого числа к значению рабочего диапазона, т.е. диапазона допустимых значений для обрабатываемых операндов. Если был расширен базис СОК (с целью контроля возникающих из-за физических помех или сбоев арифметических ошибок), то можно обозначить некоторую границу, превысив которую число будет считаться ошибочным. Тогда совокупность рабочего диапазона и запрещённой области значений можно определить как «полный диапазон»). Вычисляется такая величина F от числа A в остаточном представлении по следующей формуле:

$$F(A) = \sum_{i=1}^n |k_i * a_i|_1, \quad (2)$$

где k_i – коэффициенты, константные для заданного набора модулей СОК, a_i – значения остатков представляемого числа по модулям.

Выполнение суммирования по модулю 1 подразумевает под собой, что у конечного результата отбрасывается целая часть, чтобы в дальнейшем можно было рассматривать только дробную.

Коэффициенты, в свою очередь, определяются по формуле:

$$k_i = \frac{|\rho_i| p_i^{-1}}{p_i}, \quad (3)$$

где ρ_i является отношением произведения P всех модулей системы к соответствующему p_i , а $|\rho_i| p_i^{-1}$ – обратное по умножению по модулю p_i значение.

Таким образом, имеется возможность быстрее сравнивать числа путём сравнения их проще получаемых относительных величин, не выполняя сложного преобразования в позиционную систему счисления. То же самое значение для теоретической проверки правильности формул можно получить, разделив исходное число A на рабочий диапазон P .

Методы реализации элементарных функций в СОК

Серьёзных изменений в методах вычислительной математики не происходило уже очень давно. В ходе исследования новейший из рассмотренных методов был обнаружен в книге 1987-го года издания [25]. В ходе исследования были рассмотрены методы численного вычисления значений функций, применяемые традиционно в вычислительной технике. После ознакомления с их особенностями были сделаны

предложения для адаптации некоторых из этих методов для реализации, работающей в СОК.

Под элементарными функциями в данной работе подразумеваются такие функции, вычисление которых требует только набор базовых арифметических операций. В частности, элементарными являются следующие функции: извлечение квадратного корня, логарифм, возведение в степень n числа, тригонометрические функции.

В некоторых исследованиях деление относят к составным операциям (традиционно подразумевается, что это базовая операция, но в рамках аппаратной реализации деление часто реализуется через операции сложения и умножения, т.е. является составной). К составным операциям также относят вычисление значения многочлена и выполнение действий над комплексными и гиперкомплексными числами (кватернионами), вычисление интеграла.

В книге [26] утверждается, что функцию приближают либо алгебраическими полиномами, либо тригонометрическими суммами, либо сплайнами, используя при этом лишь конечное число значений функции. Если приближение тригонометрическими суммами оптимально использовать для сложных функций, то остальные вполне могут использоваться для элементарных функций [26].

Авторы труда [25] привели следующий список известных методов для вычисления элементарных функций, применяемых в цифровой вычислительной технике: разложение в ряд Тейлора (степенные полиномы, например, полином Чебышева), аппроксимация с помощью различных полиномов, табличные методы, рациональные приближения, метод цепных дробей, итерационные (рекуррентные), а также метод, названный «цифра за цифрой». Метод «цифра за цифрой» (известный также как “Cordic” или “Алгоритм Волдера”) позволяет вычислить большинство элементарных функций за время трёх операций деления (если не учитывать приведение аргумента), причём его алгоритмам присущ внутренний параллелизм, позволяющий ещё более повысить быстродействие за счёт совмещения операций в одном процессоре. Недостатками, по мнению авторов, являются большое количество используемых констант и применение операционного устройства со специфической структурой. В основе данного метода лежит процедура, которая в геометрическом смысле является последовательностью преобразований вектора в плоскости xu , т.е. последовательность поворотов ра-

диус-вектора на стандартные углы вокруг начала координат с одновременным изменением длины вектора. Метод имеет высокое быстродействие, так как основан на операциях сдвига и сложения [27].

Ещё в 80-е годы прошлого столетия, сразу как смог позволить технологический прогресс, стали использовать аппаратную реализацию некоторых математических функций, и считали её очень актуальной. Сейчас, когда элементная база стала совершеннее (повысилось быстродействие, снизился размер и энергопотребление элементов), вопрос стал ещё более значимым.

Также авторы [25] отмечают, что, например, операция извлечения квадратного корня включается как самостоятельная в систему команд ЭВМ в том случае, когда она составляет не менее 2% от общего числа операций или является составной частью алгоритмов, которые необходимо выполнять в реальном масштабе времени, т.е. с высоким быстродействием. В [25] указано, что самым известным методом для вычисления элементарных функций является аппроксимация рядом Тейлора. Он требует выполнения m операций умножения и m операций сложения, где m – степень полинома. Достоинством этого метода авторы считают то, что коэффициенты членов ряда можно вычислять непосредственно при вычислении функции и не хранить их в памяти. Недостатком же является то, что ряд Тейлора очень медленно сходится для некоторых функций (натуральный логарифм, обратные тригонометрические функции и гиперболические функции). Но для большинства задач этот метод хорошо подходит для вычислений в системе остаточных классов.

Однако чаще всего, по мнению авторов [25] на момент публикации их книги, применяется метод полиномиальной аппроксимации, который имеет обратный недостаток – требует хранить в памяти большое количество коэффициентов всех полиномов. Метод цепных дробей требует мало констант, а также меньшее число шагов в сравнении с методом степенных полиномов, однако на каждом шаге выполняется операция деления, занимающая много времени.

В работе [28] исследовались численные методы вычисления тригонометрических элементарных функций синуса и косинуса с помощью степенных рядов и цепных дробей. По утверждениям авторов, данные способы являются наиболее часто реализуемыми на вычислительных устройствах. Они сделали оценку вклада погрешности (в основном погрешности

округления) в вычисления и определили зависимость количества итераций приближения значений функций от разрядности аргумента и точности, которую нужно достичь. Получается, что для небольшого размера требуется большее число итераций, чтобы «попасть» в заданную точность. Цепную дробь выгодно использовать для значений аргумента близких к нулю. В этом случае заметно влияние вклада ошибки от приближения числа, от количества разрядов на мантиссу и от того, насколько велико значение.

Наблюдается периодическая зависимость количества итераций от аргумента для степенных рядов. Следовательно, в случае если необходимо уменьшить число итераций, можно поменять способ вычисления на цепную дробь. Тогда подсчёт происходит быстрее, но менее точно. Скорость сходимости метода цепных дробей выше.

Конкретно для вычисления квадратного корня, в свою очередь, выделяют 2 способа аппаратной реализации [25]:

1) Метод Ньютона (для численного решения функций, используемая частная форма называется итерационной формулой Герона).

2) Метод поразрядного определения значения корня.

Первый путь решения задачи связан с разработкой микропрограммы извлечения квадратного корня с использованием набора основных арифметических операций. Недостатком данного метода является то, что необходимо вычислять циклично формулу, содержащую 2 операции деления (считающейся сложной), некоторое множество итераций. Традиционно данный метод больше приспособлен для программной реализации. Другой путь состоит в создании алгоритма извлечения квадратного корня, похожего на алгоритм основных арифметических операций, например, деления.

Представленный алгоритм сводится к подбору цифр результата разряд за разрядом, начиная со старшего (этот способ считается более предпочтительным). Таким образом, алгоритм сводится к итерационному вычислению, однако здесь не идёт рекурсия с использованием вычислений над предыдущим значением формулы для получения уточнённого нового значения, а идёт спуск, проходящий с проверкой по набору разрядов предполагаемого значения корня.

Для определения всех цифр корня вычисляется формула разности A (число, чей корень вычисляется) и квадрата значения B (число, значения разрядов которого мы изменяем). На

каждой итерации в очередной разряд В ставится единица. Если разность положительная, то в текущий разряд остаётся с единицей. Иначе в текущий разряд ставится нуль.

В рамках свойств вычислений в системе остаточных классов можно отметить следующее:

1. Возведение в степень выполняется намного быстрее, чем в позиционной системе счисления.

2. Определение знака вызывает затруднения. Это можно реализовать как сравнение с нулём. Технически нужно использовать расширенный диапазон, значение границы которого можно хранить как константу. Для сравниваемого числа придётся вычислять относительную величину. Это относится также к вопросу обнаружения переполнения в СОК.

3. Вместо подстановки «1» или «0» необходимо организовать выборку для суммы значений степени двойки. Нужно определять максимально допустимую степень, чтобы искать значение корня, спускаясь к нулевой степени.

На основе описанного двоичного позиционного алгоритма и указанных выше примечаний разработан алгоритм ускоренного вычисления значений арифметического квадратного корня из числа, представленного в СОК, использующий следующий набор переменных и констант:

1. А - число, корень которого алгоритм ищет (представлено в СОК)

2. В - текущее значение приближённого корня (сумма аппроксимации корня) (представлено в СОК)

3. FA – относительная величина для А

4. FB1 – относительная величина для $(B+S1)^2$

5. FB2 – относительная величина для $(B+S2)^2$

6. FB3 – относительная величина для $(B+S1+S2)^2$

7. $S1=(2^i)$ (в СОК, изначально должно быть равно $2^{(DIReg-1)}$)

8. $S2=(2^{i-1})$ (в СОК)

9. $BS1=(B+S1)$ (в СОК)

10. $BS2=(B+S2)$ (в СОК)

11. $BS3=(B+S1+S2)$ (в СОК)

12. $BS1_2=(B+S1)^2$ (в СОК)

13. $BS2_2=(B+S2)^2$ (в СОК)

14. $BS3_2=(B+S1+S2)^2$ (в СОК)

15. $Rd1=(A-BS1_2)$ (в СОК)

16. $Rd2=(A-BS2_2)$ (в СОК)

17. $Rd3=(A-BS3_2)$ (в СОК)

18. $dz1$ – дизъюнкция (ИЛИ) всех разрядов числа $Rd1$, равная 1 при $Rd1 \neq 0$

19. $dz2$ – дизъюнкция (ИЛИ) над $Rd2$, равная 1 при $Rd2 \neq 0$

20. $dz3$ – дизъюнкция (ИЛИ) над $Rd3$, равная 1 при $Rd3 \neq 0$

21. $Rf1=(FA-FB1)$ (относительная величина)

22. $Rf2=(FA-FB2)$ (относительная величина)

23. $Rf3=(FA-FB3)$ (относительная величина)

24. $x1$ – знак числа $Rf1$

25. $x2$ – знак числа $Rf2$

26. $x3$ – знак числа $Rf3$

27. z – размер анализируемого на наличие нулей блока в регистре (двоичное позиционное короткое значение, заранее устанавливаемая константа)

28. $halfA$ – значение размера половины длины представления числа FA в регистре (двоичное позиционное короткое значение)

29. st – двоичное позиционное короткое значение, равное одному из значений от 1 до z

30. $Sts=2^{-st}$ (в формате СОК), т.е. обратное по умножению к двойке в положительной степени st ($2^{-st} \bmod p$, где P – множество модулей СОК)

31. $DIReg$ – значение длины регистра для относительных величин (двоичное позиционное короткое значение)

32. $DIbzero$ – длина блока нулей, идущих непрерывным рядом слева от старшей значащей единицы числа FA, размещённого в регистре (двоичное позиционное короткое значение)

33. $DI A$ – длина числа FA, размещённого в регистре (двоичное позиционное короткое значение)

34. Sn – значение двойки в степени, максимально представимое в регистре R.FA (константа в СОК)

35. d – результат дизъюнкции всех разрядов анализируемого блока размером z в регистре для относительных величин.

Разработанный алгоритм имеет следующее обобщённое описание:

1) Вычисление $FA=F(A)$.

2) Определение $DIbzero$. На каждой итерации генерируется новое значение Sts . Одновременно с этим на каждой итерации данного процесса выполняется модулярное индексное умножение $S1$ и $S2$ (равные изначально Sn и $Sn/2$) на Sts .

3) Определяется значение DIA путём вычисления разности ($DIReg - DIbzero$).

4) Определяется $halfA$, равное DIA после сдвига его значения на 1 шаг вправо.

5) Выполняется умножение $S1$ и $S2$ на значение 2^{-halfA} в СОК.

6) Выполняется цикл формирования корня на основе выборки в сумму аппроксимации степеней двойки, начиная с той, что равна $S1$. Дополнительно на каждой итерации проверяется и следующая степень, равная $S2$.

Пункт представляет из себя цикл, состоящий из следующих параллельных блоков операций:

1) Вычисление модулярных сумм текущего значения приближённого корня B (изначально равно нулю) и двух степеней двойки – наивысшей возможной для вхождения в ряд аппроксимации корня $S1$ и на один порядок меньшей $S2$ (показатель степени ниже на единицу). Значения соответствующих сумм обозначаются как $BS1$ и $BS2$.

2) Вычисление модулярной суммы для $BS1$ и $S2$ для случая, когда обе степени двойки, идущие подряд, входят в ряд аппроксимации. Сумма этих двух степеней и предыдущего значения приближённого корня обозначается как $BS3$. Одновременно с этим выполняется модулярное возведение в квадрат предыдущих промежуточных значений приближённого корня $BS1$ и $BS2$, где результаты обозначены как $BS1_2$ и $BS2_2$.

3) Возведение в квадрат $BS3$ для получения $BS3_2$. Параллельно с этим идёт получение следующих значений степеней двойки $S1$ и $S2$ путём умножения на обратную модулярную величину числа 2 (производя, по сути, деление на 2 в СОК).

4) Вычисляются относительные величины для этих квадратов, обозначаемые как $FB1$, $FB2$ и $FB3$.

5) Вычисление позиционной разности относительных величин приближённых корней $FB1$, $FB2$ и $FB3$ и относительной величины FA . Результаты обозначаются как $Rf1$, $Rf2$ и $Rf3$ с соответствующими значениями знаков разности $x1$, $x2$, $x3$.

6) Выполняются логические дизъюнкции всех разрядов значений разностей квадратов с FA . Для каждой разности соответствующие результаты обозначаются как $dz1$, $dz2$ и $dz3$. Это выявляет равенство нулю для нахождения истинного корня числа A .

7) Если все значения ($dz1$, $dz2$, $dz3$) равны логической единице и одно из ($x1$, $x2$, $x3$) равно нулю, то при $x1=0$, $x2=0$, $x3=1$ или $x1=0$, $x2=1$, $x3=1$ выполняется верным значением приближённого корня на данной итерации цикла принимается $BS1$ и присваивается переменной B .

Если $x1=0$, $x2=0$, $x3=0$, то соответственно выполняется присваивание $BS3$.

Если $x1=1$, $x2=0$, $x3=1$, то выполняется $B=BS2$.

Если $x1=1$, $x2=1$, $x3=1$, то B не перезаписывается, оставаясь прежним.

Цикл выполняется до тех пор, пока не произойдёт одно из 2-х событий:

1. Одно из значений набора ($dz1$, $dz2$, $dz3$) стало равно нулю. Это означает, что если разница A и одного из квадратов предполагаемого корня ($BS1_2$, $BS2_2$, $BS3_2$) равна нулю, то возведённое в квадрат вычитаемое и является истинным корнем числа A .

2. Если $x1=0$, $x2=1$, $x3=1$. Это означает, что $S1=1$, а $S2$ имеет результат переполнения.

3. Если на предыдущей итерации было $S1=2$, а $S2=1$ (т.е. если при итерировании степеней $S1$ и $S2$ был достигнут нижний предел), то в таком случае или в случае переполнения $S2$ считается, что найден предельно приближённый корень числа A , выявляемый наибольшей положительной разностью относительных величин с FA .

$Anz(fx)$ – функция, анализирующая блок разрядов на количество нулей, идущих непрерывным рядом слева от старшей единицы, если она вообще присутствует в блоке. Принимает относительную величину fx и читает только блок от нулевого разряда по $(z-1)$ -й. Выдаёт на вход значение st , имеющее значение в диапазоне $[0, z]$.

Если $st>0$, то далее в алгоритме выполняется умножение на обратную степень двойки.

Если $st=0$, то это означает, что в старшем разряде блока находится единица и данный цикл завершается без последнего умножения.

Завершение цикла в первую очередь определяется значением $d=1$, равное дизъюнкции всех разрядов анализируемого блока. Если была обнаружена единица в блоке, то нули закончились.

$ExSOC(st, zk)$ – функция формирования степеней двойки в СОК. Выдаёт значения Sts . Если $st=0$, то выдаёт единицу в СОК. Выдаёт значения 2 в степени $-st$ или кратные z . Нужно определить дополнительный входной сигнал для выдачи кратных z . Пусть это будет zk . Если

$zk=0$, то степень определяется входом st , иначе значение входа st игнорируется.

Пусть $g1$ – знак разности $halfA$ и z . Тогда будем также рассматривать $g2, g3, g4$ как знаки соответствующих разностей с кратными z .

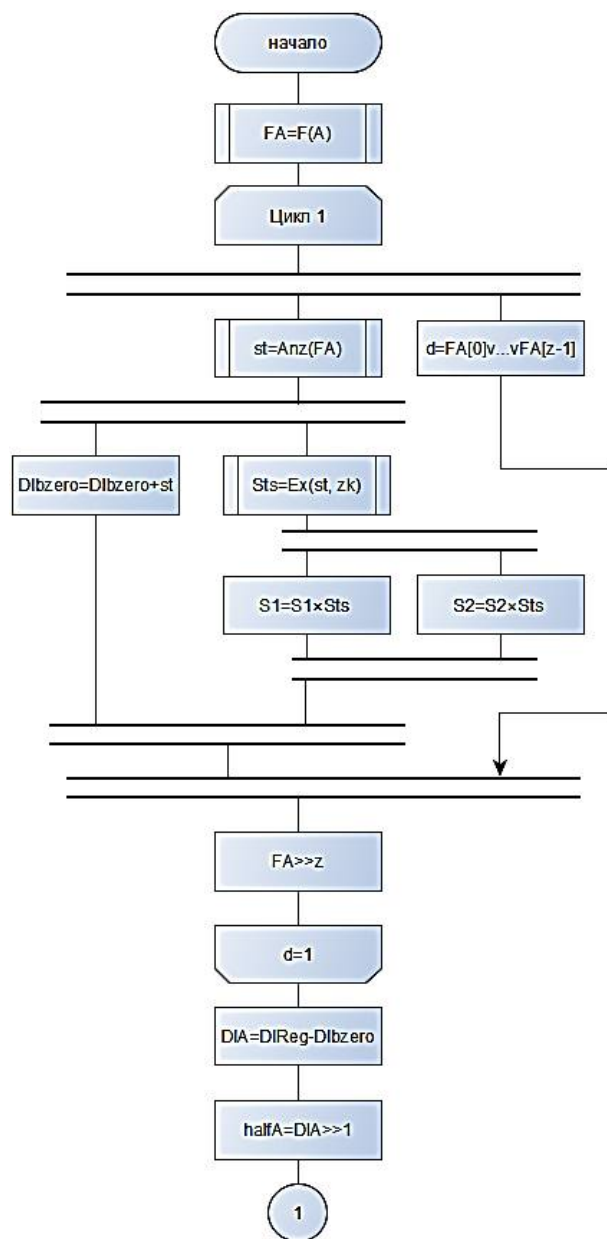


Схема алгоритма извлечения квадратного корня

В таком случае обозначим сами разности как $dif1, dif2, dif3, dif4$.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на следующем рисунке.

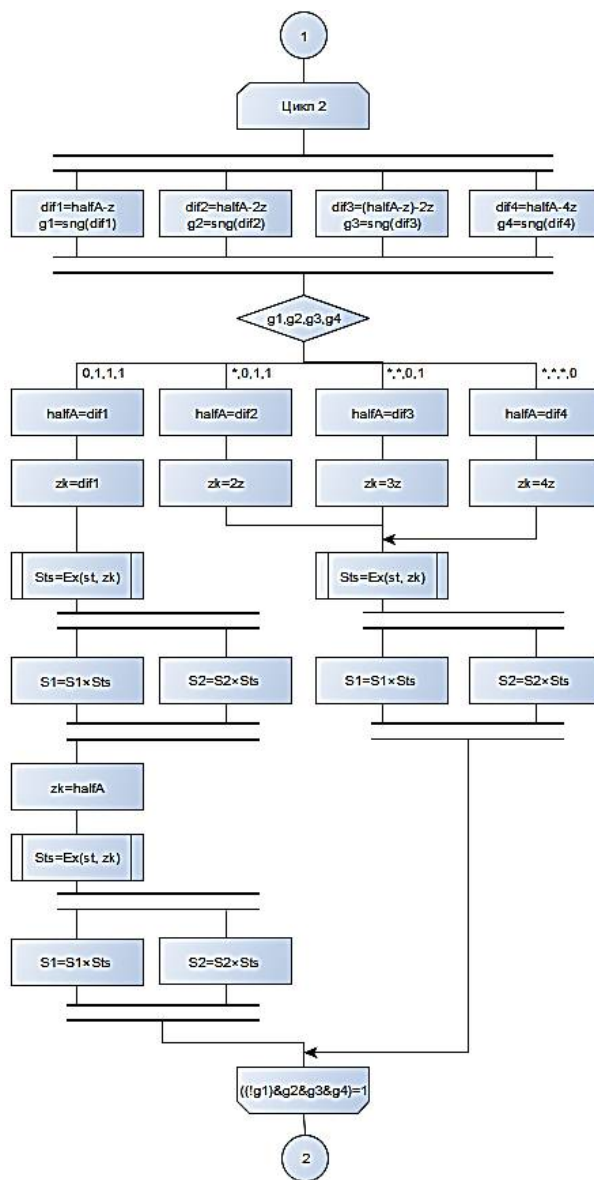


Схема алгоритма извлечения квадратного корня (продолжение)

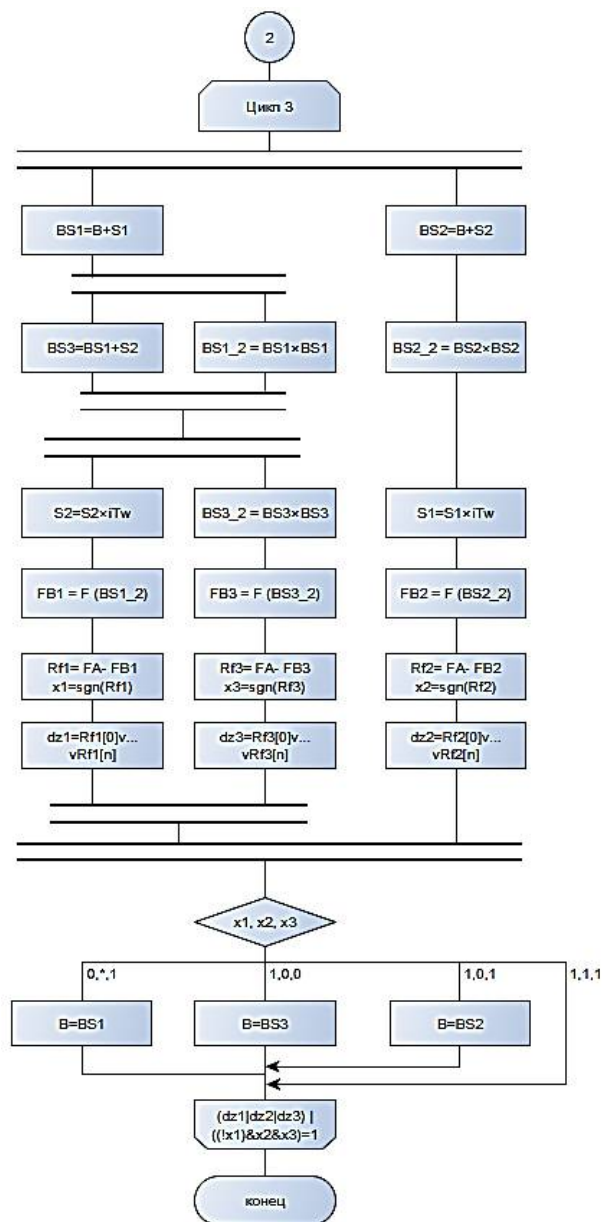


Схема алгоритма извлечения квадратного корня (окончание)

При аппаратной реализации данного алгоритма все операции, за исключением $F()$, очень просты и выполняются меньше, чем за 1 такт. Технически сигнал просто быстро проходит через несколько малых комбинационных схем, выдавая затем результат. Также многие пункты выполняются параллельно. В частности, обработка операций по различным модулям СОК или одновременная проверка степеней двойки как в СОК, так и в относительных величинах. Кроме того, стоит отметить, что потребуется следующий набор регистров:

а) R.A – для числа, корень которого алгоритм ищет (в СОК)

б) R.B – текущее значение приближённого корня (сумма) (в СОК)

с) R.S1 – для степени двойки (2^i) (в СОК, изначально содержит значение S_n , после завершения извлечения корня, регистр R.S1 сбрасывается в это состояние как начальное)

д) R.S2 – для степени двойки (2^{i-1}) (в СОК)

е) R.FA – для относительной величины FA

ф) R.BS1 – для величины $(B+S1)$ (в СОК)

г) R.BS2 – для величины $(B+S2)$ (в СОК)

h) R.BS3 – для величины $(B+S1+S2)$ (в СОК)

и) R.FAt – для относительной величины FA (временно, потом сдвигается)

j) R.Dlbzero – для длины блока нулей слева от числа в регистре R.FAt.

Если глубина схемы $F()$ велика, то создаётся либо 3 регистра для FVi значений, либо промежуточные регистры, которые будут хранить промежуточные суммы при вычислении $F()$ для разных вариантов FVi . Тогда специальный регистр R.Fat не нужен. Промежуточные регистры для $F()$ будут в общей сумме длиннее, чем общая длина регистров для FVi значений, т.к. FVi являются конечными суммами. Чем меньше модулей в СОК, тем меньше глубина схемы $F()$.

Заключение

В результате проведённого анализа предметной области исследования сделаны следующие выводы:

1. Повышение скорости вычислений при высокой точности результатов обработки является актуальной проблемой в различных областях научных и промышленных расчётов.

2. После сравнения особенностей различных систем счисления было принято решение, что система остаточных классов является наиболее перспективной для дальнейших исследований.

3. Создание быстродействующих методов выполнения таких сложных арифметических операций, как деление и извлечение квадратного корня из числа в системе остаточных классов позволит расширить область эффективного применения модулярной арифметики.

4. Фундаментальной проблемой, ограничивающей возможности ускорения вычисления результатов немодульных операций и вносящей сложность в алгоритмы, является слож-

ность интерпретации величины числа в остаточном представлении.

5. Аппаратная поддержка высокоточной арифметики в современных вычислительных системах, построенных на базе процессоров общего назначения, отсутствует, поэтому основными инструментами реализации высокоточных вычислений являются специализированные программные средства, которые используют различные методы представления и алгоритмы обработки чисел большой разрядности. Разрабатывались различные способы ускорения программных вычислений и на основе вычислений в системе остаточных классов. Также можно отметить, что выполнение немодульных операций в многоядерной среде будет ниже, чем в специализированной схеме на одном кристалле, так как имеются временные издержки на передачу данных между ядрами.

Поэтому можно сделать вывод, что создание быстродействующей аппаратной реализации немодульных арифметических операций в системе остаточных классов с высокой точностью чисел является актуальной задачей. Разработан алгоритм ускоренного вычисления квадратного корня в СОК.

Литература

1. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, IEEE Computer Society, IEEE Std 754, 2019.
2. Bailey D.H., Barrio R., Borwein J.M. High-precision computation: Mathematical physics and dynamics in Applied Mathematics and Computation. Vol. 218. No. 20. 2012. pp. 10106-10121.
3. Исупов К.С. Методы и алгоритмы организации высокоточных вычислений в арифметике остаточных классов для универсальных процессорных платформ: дис.... канд. техн. наук. Киров: ВятГУ, 2014.
4. Карацуба А.А., Офман Ю.П. Умножение многозначных чисел на автоматах // Докл. АН СССР. 1962. Т. 145. № 2. С. 293–294.
5. Алгоритм Фюрера / Е.А. Дмитриев, В.В. Швейкин, С.Д. Завгородний, И.В. Танаев // Студенческая наука XXI века: материалы XII Междунар. студ. науч.-практ. конф. Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017. С. 297–300. ISSN 2413-3825
6. Burnikel C., Ziegler J. Fast Recursive Division, Max-Planck-Institut fuer Informatik Research Report MPI-I-98-1-022, Im Stadtwald, D- Saarbrucken, 1998.
7. Hasselström K. Fast Division of Large Integers: A Comparison of Algorithms, (M.Sc. in Computer Science thesis). Royal Institute of Technology, 2003.
8. Долгов Д.А. О расширенном алгоритме Джебелана–Вебера–Седжелмаса вычисления наибольшего общего делителя// Чебышевский сборник. 2018. Т. 19. Вып. 2. С. 421–431.
9. Bailey D.H., Borwein J.M. High-Precision Arithmetic in Mathematical Physics in Mathematics. 3 (2015). pp. 337–367
10. Moore R.E., Bierbaum F. Methods and Applications of Interval Analysis. Philadelphia: SIAM, 1979. 190 p. ISBN 0-898-71161-4.
11. Акритас А. Основы компьютерной алгебры с приложениями: Пер. с англ. М.: Мир, 1994. 544 с.
12. Аноприенко А.Я., Гранковский В.А., Иваница С.В. Пример Рунга в контексте традиционных, интервальных и постбинарных вычислений // Научные труды Донецкого национального технического ун-та. Сер. «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем». 2011. № 9(179). С. 324–343. ISSN 2074-7888.
13. Гамаюн В.П., Коврижкин И.О. Структурно-алгоритмический метод высокоточных вычислений на основе разрядно-логарифмической системы счисления. Киев: Книжное изд-во НАУ, 2012. № 1(37). С. 41–44.
14. Гамаюн В.П. Арифметико-алгоритмический базис моделирования компьютерных средств. Киев: Книжное изд-во НАУ, 2008. № 1(23). С. 215–220.
15. Kingsbury N.G., Rayner P.J.W. Digital Filtering Using Logarithmic Arithmetic// Electronics Letters. 1971. V. 7. p. 56–58.
16. Коржавина А.С. Исследование эффективности реализации логарифмической интервальной арифметики на универсальных процессорах: материалы Междунар. науч.-техн. конф. INTERMATIC. М.: МИРЭА, 2016. Ч. 4. С. 165–168.
17. Евстигнеев В.Г. Недвоичные компьютерные арифметики // Электроника и информатика – 2005: Междунар. науч.-техн. конф. М.: Ангрэм, 2006. 774 с.
18. Сергеев А.М. Об особенностях представления чисел при знакоразрядном кодировании и вычислительный эксперимент с ними// Информационно-управляющие системы. 2006. № 3(22). С. 56–58.
19. Сергеев М.Б., Сергеев А.М. Разрядная конвейеризация вычисления значений функций при полиномиальной аппроксимации // Микропроцессорные информационно-управляющие системы реального времени. СПб.: Политехника, 2000. С. 85–92.
20. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И. Машинная арифметика в остаточных классах. М. «Советское радио», 1968. 440 с.
21. Грегори Р.Т., Кришнамурти Е.В. Безошибочные вычисления. Методы и приложения: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 208 с.
22. Оцок Ш.А. Структурно-алгоритмические методы организации высокоточных вычислений на основе теоретических обобщений в модулярной системе счисления: дис.... д-ра техн. наук: 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления; 05.13.15 - Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети. М.: МЭИ ТУ, 2010. 287 с.
23. Патент 2559772, Российская Федерация, МПК G06F 7/72. Устройство для основного деления модулярных чисел в формате системы остаточных классов / Червяков Н.И., Бабенко М.Г., Лавриненко И.Н., Ляхов П.А., Лавриненко А.В.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». № 2013149446; заявл. 06.11.2013; опубл. 10.08.2015, Бюл. №14.
24. Новичков М.Д. Исследование и разработка методов реализации операции деления в системе остаточных классов: Магистерская диссертация. М.: МЭИ, 2019.
25. Прикладная теория цифровых автоматов/ К.Г. Самофалов, А.М. Романкевич, В.Н. Валуйский, Ю.С. Каневский, М.М. Пиневиц. Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1987. 375 с.

26. Авхадиев Ф.Г. Численные методы анализа: учеб. пособие. Казань: Казанский федеральный университет, 2013. 126 с.

27. Берёза А.Н., Ляшов М.В. Аппаратная реализация нелинейных математических функций для нейронных сетей// Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2008. С. 194-198.

28. Строганов Ю.В., Пудов Д.Ю., Сиденко А.Г. Исследование численных методов для синуса и косинуса// Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы 21-го науч.-практ. семинара. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. С. 363-366.

Поступила 29.03.2021; принята к публикации 22.06.2021

Информация об авторах

Новичков Михаил Дмитриевич – аспирант, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, д. 14), e-mail: NovichkovMD@mpei.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6591-3666>

Орлов Дмитрий Александрович - канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, д. 14), e-mail: OrlovDmA@mpei.ru

APPLICATION OF NON-BINARY NUMERAL SYSTEMS FOR ORGANIZING HIGH-PRECISION COMPUTATIONS

M.D. Novichkov, D.A. Orlov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

Abstract: the purpose of this article is to find a way to increase the efficiency of calculating elementary functions, when the criteria for evaluating efficiency is speed (which depends on the complexity of algorithms, processor clock frequency and degree of parallelization) and the amount equipment required for organization the computations. Many calculations in science and industry require the use of high-precision calculations. However, when using methods oriented to the positional binary numeral system, the computation time is rather long. Within the framework of this study, we give an overview of the most well-known traditional methods of calculation with increased accuracy, we studied existing solutions using non-binary numeral systems. In particular, we described such numeral systems as bit-logarithmic, sign-bit numeral system and multi-modular system of residual classes with advantages and disadvantages. Special attention was paid to the system of residual classes, a non-positional numeral system, which is inherent by internal natural parallelism. After considering the methods for the numerical solution of elementary functions, we developed an algorithm for the accelerated extraction of the square root in the system of residual classes. We formulated this algorithm on the basis of one of the methods that were analyzed in the course of the study, and it can be implemented as a software module, however, it will be most effective if it is implemented as an electronic circuit on a chip. We give the descriptions of the conditions that must be taken into account during the hardware implementation of the algorithm. These notes contain recommendations for the synthesis of the structure of the device, taking into account the physical characteristics of the propagation of information signals in electronic combinational logic circuits

Key words: non-binary numeral systems, high-precision computing, modular arithmetic, residue numeral system, elementary functions, square root

References

1. "IEEE standard for floating-point arithmetic", IEEE Computer Society, IEEE Std 754, 2019.
2. Bailey D.H., Barrio R., Borwein J.M. "High-precision computation: Mathematical physics and dynamics", *Appl. Math. Comput.*, 2012, vol. 218, no. 20, pp. 10106-10121.
3. Isupov K.S. "Methods and algorithms for organizing high-precision computations in residual class arithmetic for universal processor platforms" ("Metody i algoritmy organizatsii vysokotochnykh vychisleniy v arifmetike ostatochnykh klassov dlya universal'nykh protsessornykh platform"), Cand. Tech. Sci. diss., Kirov, Vyatka State University, 2014, 256 p.
4. Karatsuba A.A., Ofman Yu.P. "Multiplication of multidigit numbers on automata", *Proc. of Academy of Sciences (Doklady Akademii Nauk SSSR)*, 1962, vol. 145(2), pp. 293-294.
5. Dmitriev E.A., Shveykin V.V., Zavgorodniy S.D., Tanaev I.V. "Furer's algorithm", *Proc. of the XII International Student Scientific and Practical Conf.: Student Science in the XXI Century (Studencheskaya nauka XXI veka: materialy XII Mezhdunar. stud. nach.-prakt. konf.)*, Cheboksary: Interaktiv plus, 2017, pp. 297-300.
6. Burnikel C., Ziegler J. "Fast recursive division", *Max-Planck-Institut fuer Informatik Research Report MPI-I-98-1-022*, Im Stadtwald, D- Saarbrücken, 1998.
7. Hasselström K. "Fast division of large integers: a comparison of algorithms", *M.Sc. in Computer Science thesis*, Royal Institute of Technology, 2003.
8. Dolgov D.A. "An extended Jebelean-Weber-Sedjelmaci GCD algorithm", *Chebyshev Collection (Chebyshevskiy Sbornik)*, 2018, vol. 19, no. 2, pp. 421-431.
9. Bailey D.H., Borwein J.M. "High-precision arithmetic in mathematical physics", *Mathematics*, 2015, no. 3, pp. 337-367.
10. Moore R.E., Bierbaum F. "Methods and applications of interval analysis", Philadelphia: SIAM, 1979, 190 p. ISBN 0-898-71161-4.

11. Akritas A. "Elements of computer algebra with applications" ("Osnovy komp'yuternoy algebrы s prilozheniyami"), Moscow, Mir, 1994, 544 p.
12. Anoprienko A.Ya., Grankovskiy V.A., Ivanitsa S.V. "Rump example in the context of traditional, interval and postbinary computing", *Scientific Papers of Donetsk National Technical University (Nauchnye Trudy Donetskogo natsional'nogo tekhnicheskogo un-ta)*, Donetsk, 2011, no. 9(179), pp. 324-343.
13. Gamayun V.P., Kovrizhkin I.O. "Structural-algorithmic method of high-precision calculations based on the bit-logarithmic numeral system" ("Strukturno-algoritmicheskiy metod vysokotochnykh vychisleniy na osnove razryadno-logarifmicheskoy sistemy schisleniya"), Kiev, National Aviation University, 1 (37), 2012, pp. 41-44.
14. Gamayun V.P. "Arithmetic-algorithmic basis for modeling computer tools" ("Arifmetiko-algoritmicheskiy bazis modelirovaniya komp'yuternykh sredstv"), Kiev, National Aviation University, 1 (23), 2008, pp. 215-220.
15. Kingsbury N.G., Rayner P.J. W. "Digital filtering using logarithmic arithmetic", *Electronics Letters*, 1971, vol. 7, pp. 56-58.
16. Korzhavina A.S. "Investigation of the effectiveness of realization of logarithmic interval arithmetic on universal processors", *Proc. of the International Scientific and Technical Conf. INTERMATIC-2016 (materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. INTERMATIC)*, Moscow (MIREA), 2016, vol. 4, pp. 165-168.
17. Evstigneev V.G. "Non-binary computer arithmetic", *Proc. of the International Scientific and Technical Conf.: Electronics and Computer Science - 2005 (Elektronika i Informatika - 2005: Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, Moscow, Angsrem, 2006, 774 p.
18. Sergeev A.M. "On the signed-digit representation of numbers and a related computational experiment", *Information and Control Systems (Informatsionno-upravlyayushchie sistemy)*, St. Petersburg, 2006, no. 3(22), pp. 56-58.
19. Sergeev M.B., Sergeev A.M. "Bit pipelining for calculating the values of functions with polynomial approximation", *Real-Time Microprocessor Information and Control Systems (Mikroprotsessornye informatsionno-upravlyayushchiye sistemy real'nogo vremeni)*, St. Petersburg, Politehnika, 2000, pp. 85-92.
20. Akushskiy I.Ya., Yuditskiy D.I. "Computer arithmetic in residual classes" ("Mashinnaya arifmetika v ostatechnykh klassah"), Moscow, Sov. radio, 1968, 440 p.
21. Gregory R.T., Krishnamurthy E.V. "Methods and applications of error-free computation" ("Bezoshibochnye vychisleniya. Metody i prilozheniya"), Moscow, Mir, 1988, 208 p.
22. Otsokov Sh.A. "Structural-algorithmic methods of high-precision computing on the basis of a modular numeral system" ("Strukturno-algoritmicheskie metody organizatsii vysokotochnykh vychisleniy na osnove teoreticheskikh obobshcheniy v modularnoy sisteme schisleniya"), Dr. of Tech. Sc. diss., 05.13.05, Moscow, MPEI, 2010, 287 p.
23. Chervyakov N.I., Babenko M.G., Lavrinenko I.N., Lyakhov P.A., Lavrinenko A.V. "Device for basic division of modular numbers in the format of the residual classes system" ("Ustroystvo dlya osnovnogo deleniya modulyarnykh chisel v formate sistemy ostatechnykh klassov"), patent no. 2559772 of the Russian Federation, dec. 06/11/2013, publ. 10/08/2015, bul. no. 14.
24. Novichkov M.D. "Research and development of methods for implementing the division operation in the system of residual classes" ("Issledovanie i razrabotka metodov realizatsii operatsii deleniya v sisteme ostatechnykh klassov"), Master's thesis, Moscow, MPEI, 2019.
25. Samofalov K.G., Romlinkevich A.M., Valuiskiy V.N., Kanevskiy Yu.S., Pinevich M.M. "Applied theory of digital automata" ("Prikladnaya teoriya tsifrovyykh avtomatov"), Kiev, Vysshaya shkola, 1987, 375 p.
26. Avkhadiev F.G. "Numerical methods of analysis" ("Chislenne metody analiza"), Kazan, Kazan Federal University, 2013, 126 p.
27. Bereza A.N., Lyashov M.V. "Hardware realization of nonlinear mathematical functions for neural networks", *News of Southern Federal University. Technical Sciences (Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki)*, 2008, pp. 194-198.
28. Stroganov Yu.V., Pudov D.Yu., Sidenko A.G. "Investigation of numerical methods for sine and cosine", *Proc. of 21 Scientific and Practical Seminar: New Information Technologies in Automated Systems (Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh: materialy 21-go nauch.-prakt. seminar)*, Moscow: IPM named after M.V. Keldysh, 2018, pp. 363-366.

Submitted 29.03.2021; revised 22.06.2021

Information about the authors

Mikhail D. Novichkov, graduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: NovichkovMD@mpei.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6591-3666>
Dmitriy A. Orlov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: OrlovDmAl@mpei.ru

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫБОРА СЕРВЕРНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ВИРТУАЛЬНЫХ РАБОЧИХ МЕСТ

Д.К. Проскурин, К.А. Маковий

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: переход к облачным технологиям сопровождается значительными материальными затратами на формирование ИТ-инфраструктуры. Использование моделей, позволяющих оптимизировать аппаратные ресурсы, приводит к сокращению стоимости оборудования и повышает успешность инфраструктурных ИТ-проектов. Виртуализация клиентских рабочих мест значительно меняет способы взаимодействия с конечными пользователями и расширяет возможности для цифровой трансформации деятельности организации. Представлен генетический алгоритм для решения задачи выбора аппаратного обеспечения для формирования клиентских рабочих мест. Математическая модель выбора серверных платформ и объема памяти для размещения заданного количества виртуальных машин с заданными требованиями к оперативной памяти представляет собой задачу нелинейного целочисленного программирования, которая не имеет способов точного решения, поэтому для каждой такой задачи подбираются различные эвристические методы, позволяющие получить не точное, но достаточно хорошее решение за приемлемое время. Предложенный генетический алгоритм использует отличный от классического способ кодирования решения и разработанный оператор направленной мутации. Использование элитарной стратегии совместно с ранговой селекцией, помещение «лучшего» решения в генетический банк позволяют решить проблему попадания в локальные оптимумы и повышают сходимость генетического алгоритма

Ключевые слова: инфраструктура виртуальных рабочих столов, генетический алгоритм, элитарная стратегия, ранговая селекция

Введение

Технологической основой облачных технологий IaaS (Инфраструктура как услуга) является платформенная виртуализация, заключающаяся в том, чтобы на одном физическом сервере запускать множество виртуальных машин. Следующим этапом трансформации ИТ-инфраструктуры является формирование инфраструктуры виртуализированных рабочих мест, когда операционная система, в которой работает конечный пользователь, выполняется на виртуальной машине, работающей на сервере, а визуальный образ доставляется с помощью специальных сетевых протоколов на конечное устройство пользователя. Преимущества такой организации ИТ-инфраструктуры – в следующем [1-3]:

1) централизация процессов технической поддержки, поскольку становится возможным осуществлять все технические работы по обновлению, переустановке ПО в нерабочее для пользователя время централизованно на сервере;

2) уменьшение аппаратных требований к конечному устройству пользователя, предоставление возможности использовать собственные устройства как в рамках концепции BYOD (Bring Your Own Device), в том числе продление срока эксплуатации настольных ПК на рабочих местах;

3) уменьшение затрат, а именно, общей стоимости владения (TCO – Total Cost of Ownership);

4) сокращение суммарного энергопотребления в соответствии с концепцией Green Computing.

Развертывание инфраструктуры виртуальных рабочих мест представляет собой комплексную проблему, затрагивающую как методы работы с пользователями, так и создание серверной инфраструктуры, обеспечивающей выполнение виртуальных машин клиентских рабочих мест. Одной из значительных статей расходов в проекте внедрения виртуализированных рабочих мест является закупка серверного оборудования, поэтому разработка модели оптимизации серверной инфраструктуры для снижения стоимости закупаемого серверного оборудования представляется актуальной задачей.

Постановка задачи

Формирование инфраструктуры виртуальных рабочих мест подразумевает перенос вычислительной мощности с ПК или другого клиентского устройства на сервер, консолидирующий виртуальные машины, все необходимое множество виртуальных машин выполняется на некотором наборе серверов. Если у организации нет избыточных вычислительных ресурсов, то перед началом внедрения инфраструктуры виртуальных рабочих мест необходимо приобрести серверное оборудование для обеспечения работы некоторого, заранее заданного количества виртуальных машин.

Для решения оптимизационной задачи и построения математической модели можно допустить необходимость выполнения одного типа виртуальных машин с заранее известными требованиями к оперативной памяти (ОЗУ) на некотором наборе серверов. Каждый сервер представляет собой серверную платформу с некоторым количеством предустановленной оперативной памяти, но в процессе формирования серверной инфраструктуры возможно изменение объема памяти путем добавления модулей памяти. Возможности добавления модулей памяти к конфигурации сервера ограничены, с одной стороны, максимальным поддерживаемым серверной платформой объемом ОЗУ, а с другой стороны, количеством доступных слотов для расширения ОЗУ.

Математическая модель

Целевая функция задачи оптимизации серверной инфраструктуры выражается стоимостью набора серверов, сформированных на основе серверных платформ, дополненных модулями оперативной памяти. Согласно [4], целевая функция описывается следующим уравнением:

$$F = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^m (c_i + \sum_{j=1}^k c_{vj} a_{ji}) n_{il}, \quad (1)$$

где c_i - стоимость i -й платформы, а c_{vj} - стоимость дополнительного модуля памяти, k - количество типов модулей памяти, m - число серверных платформ, q - количество вариантов заполнения слотов памяти всех серверных платформ модулями памяти:

$$q = \sum_{i=1}^m q_i = \sum_{i=1}^m \frac{(k+p_i)!}{p_i! k!}, \quad (2)$$

где p_i - число слотов памяти i -й серверной платформы. В (1) есть две переменные, по

которым проводится оптимизация: a_{ji} - количество модулей памяти типа j на i -й серверной платформе, и n_{il} - количество серверных платформ с конкретным вариантом заполнения слотов модулями памяти.

Ограничение по объему поддерживаемой серверной платформой ОЗУ выражается следующим образом:

$$\sum_{j=1}^k r_j a_{ji} \leq m_i, \quad i=1..n, \quad (3)$$

где r_j - объем памяти j -го модуля.

Ограничение по количеству добавляемых модулей памяти, которое не может превышать числа слотов памяти на серверной платформе:

$$\sum_{j=1}^k a_{ji} \leq p_i, \quad i=1..n. \quad (4)$$

Ограничение по достаточности объема памяти на всех серверах конечного набора для обеспечения работы заданного количества виртуальных машин

$$\sum_{i=1}^m ((\sum_{j=1}^k r_j a_{ji})/V) \geq N_V, \quad (5)$$

где N_V - это необходимое количество виртуальных машин, V - объем памяти, необходимый для работы одной виртуальной машины.

Ограничение, выражающее целочисленный характер задачи:

$$n_{il}, a_{ji} \geq 0, \quad n_{il}, a_{ji} - \text{целые}. \quad (6)$$

Модифицированный генетический алгоритм

Генетические алгоритмы (ГА) успешно применяются для решения комбинаторных задач, которые являются NP-трудными и плохо поддаются другим подходам, при этом ГА является эвристическим методом, не гарантирующим нахождение наилучшего решения, но обеспечивающим нахождение достаточно хорошего решения за приемлемое время. Для успешного эволюционного моделирования нужно закодировать решение таким образом, чтобы определить операторы репродукции: скрещивания (кроссинговера) и мутации, а также обозначить фитнес-функцию (функцию приспособленности), позволяющую оценивать полученные решения задачи [5].

В предлагаемом ГА под популяцией понимается множество решений задачи выбора оборудования, то есть различные комбинации комплектаций серверных платформ. Каждая особь в популяции содержит одну хромосому с количеством генов, равным значению q - количеству вариантов возможных комплектаций

серверных платформ, возникающих в результате заполнения слотов модулями ОЗУ, определяемому по формуле (2). В отличие от классического ГА, использующего бинарное кодирование, для кодировки хромосом используется одномерный массив или список всех возможных вариантов комплектаций серверов, элементами которого являются структуры данных (рис. 1). Каждый элемент списка содержит следующую информацию, характеризующую конкретную комплектацию:

- 1) серверная платформа,
- 2) состав модулей памяти,
- 3) общая память комплекта,
- 4) цена комплекта.

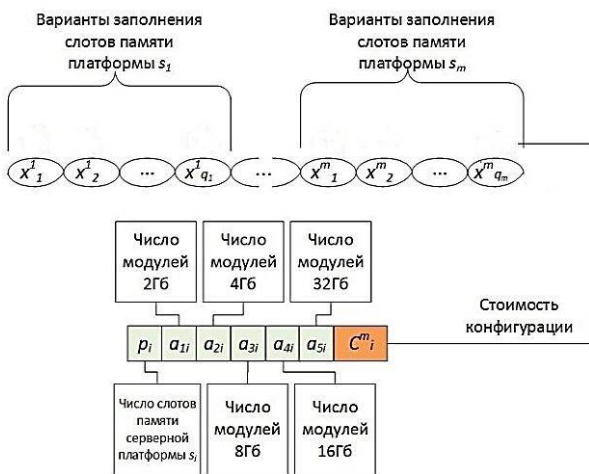


Рис. 1. Схема кодирования хромосомы

Количество генов в хромосоме берется равным количеству элементов списка вариантов комплектаций, то есть равно q . Гены внутри i -й хромосомы кодируются таким образом, чтобы порядковый номер k локуса гена x_k^i соответствовал порядковому номеру в списке вариантов комплектаций, а значение гена в этом локусе – количество серверов данного варианта комплектации (рис. 1). Возможные комбинации комплектаций серверных платформ, удовлетворяющие ограничениям (3-5), составят популяцию размером Pop в терминологии ГА. В качестве фитнес-функции используется выражение (1), определяющее стоимость решения.

Для создания начальной популяции используется следующая процедура (рис. 2). На первом этапе создается структура хромосомы с генами, значения которых равны нулю во всех локусах. Случайным образом выбирается номер записи в списке комплектаций и в соответствующий этой комплектации ген добавляется значение 1.

Далее производится проверка соответствия полученной хромосомы ограничению (5).

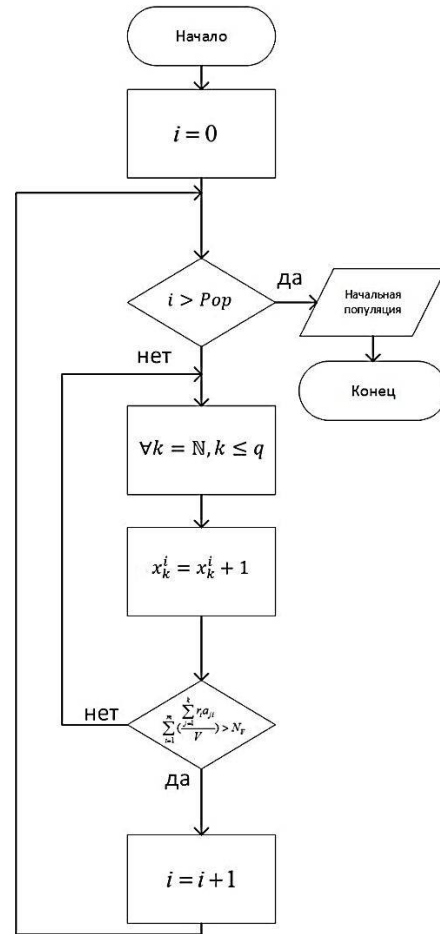


Рис. 2. Схема алгоритма генерации хромосом

Далее процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнут достаточный объем памяти. В специальную структуру данных заносится номер поколения хромосомы (G). Затем процедура повторяется для каждой новой хромосомы, количество которых задается размером популяции. Для каждой хромосомы в популяции производится оценка приспособленности путем вычисления значения фитнес-функции. Чем меньше значение этой функции, тем выше «качество» хромосомы. Далее хромосомы сортируются по возрастанию фитнес-функции для реализации ранговой селекции и подвергаются воздействию операторов репродукции.

Общая схема ГА приведена на рис. 3.

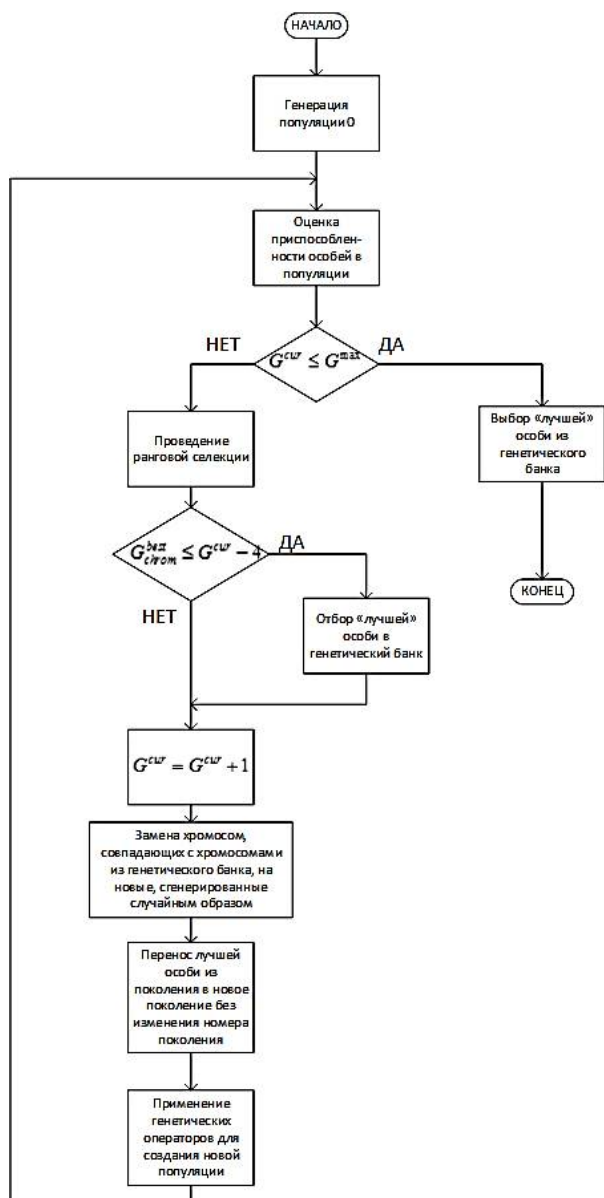


Рис. 3. Схема генетического алгоритма

Операция кроссинговера или скрещивания заключается в обмене фрагментами цепочек между двумя родительскими хромосомами. Суть работы оператора кроссинговера в разработанном ГА состоит в следующем: точка разбиения выбирается случайным образом, левая часть первой хромосомы в паре присоединяется к правой части второй хромосомы, и левая часть второй хромосомы присоединяется к правой части первой хромосомы. Таким образом, получаются две новые хромосомы, определяющие две новые особи (рис. 4).

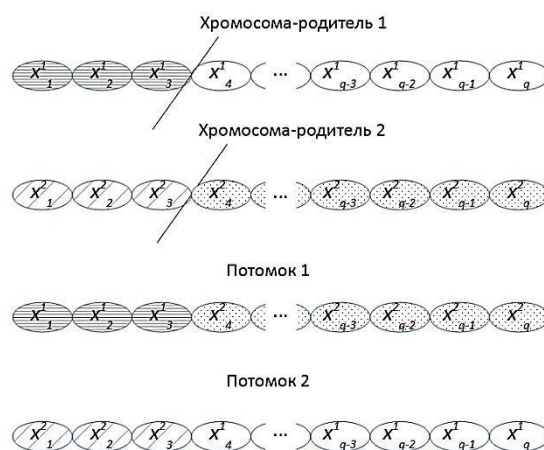


Рис. 4. Схема работы оператора кроссинговера

Над каждым поколением производятся действия операторов селекции: кроссинговера, случайной и направленной мутации. Далее анализируется каждый потомок и в случае получения «нежизнеспособной» особи (т.е. общий объем памяти особи получился меньше заданного) в случайно выбранные локусы прибавляется единица до тех пор, пока особь не станет жизнеспособной.

Отбор «жизнеспособных» особей сводится к проверке ограничения (5). Затем особи ранжируются по возрастанию значения фитнес-функции (1) и применяется концепция элитаризма. Лучшая по цене особь переносится без изменений в следующее поколение. Если лучшая особь сохраняется в неизменном виде на протяжении четырех поколений, она помещается в генетический банк и заменяется особью со вновь сгенерированной случайным образом хромосомой. Также заменяются новыми особями все особи, хромосомы которых совпадают с хромосомами особей, хранящихся в генетическом банке или не изменяющиеся более четырех поколений. Тем самым предотвращается остановка эволюции и вырождение популяции.

Далее каждая из двух новых хромосом с заданной вероятностью подвергается случайной и направленной мутации.

Случайная мутация заключается в добавлении единицы в один случайным образом выбранный ген. Направленная мутация заключается в поиске среди непустых локусов гена с минимальным соотношением цена/объем памяти и добавлением к его значению единицы и локуса максимальным соотношением цена/объем памяти и вычитанием из его значения единицы.

После выполнения скрещивания и случайной и направленной мутации в случае, если особь получается нежизнеспособной, в случайно выбранные локусы прибавляется единичка до тех пор, пока особь не станет жизнеспособной.

Выполнение вычислений заканчивается по достижении заданного количества поколений, для сходимости алгоритма достаточно пятидесяти поколений Лучшая особь из генетического банка выбирается в качестве решения задачи.

В качестве исходных данных выбора серверных ресурсов для проекта внедрения инфраструктуры виртуальных рабочих столов были использованы данные о стоимости и комплектациях линеек HP Proliant ML и DL, полностью совместимые по набору используемых модулей ОЗУ.

Основные параметры генетического алгоритма были следующие: размер популяции – 3000, 50 поколений, процент случайных и направленных мутаций – 15, расчеты показывают хорошую повторяемость результатов и сопоставимость с результатами решения задачи нелинейного целочисленного программирования путем декомпозиции и сведения ее к двум задачам целочисленного линейного программирования [6].

Заключение

В данной работе предложено решение задачи подбора серверного оборудования для формирования инфраструктуры виртуальных рабочих мест с помощью модифицированного ГА, отличающегося способом кодирования, использованием элитарной стратегии, а также

разработанным оператором направленной мутации. Использование т.н. «генетического банка» позволяет ограничить количество поколений, что значительно сокращает время работы ГА. Полученные результаты показывают совпадение с полученными альтернативным способом решения задачи целочисленного нелинейного программирования.

Литература

1. Rot A., Chrobak P. Benefits, Limitations and Costs of IT Infrastructure Virtualization in the Academic Environment. Case Study using VDI Technology // ICSOFT. 2018. p. 738-745.
2. Chawla N., Kumar D. Desktop Virtualization—Desktop as a Service and Formulation of TCO with Return on Investment // Software Engineering. Springer, Singapore, 2019. p. 599-608.
3. Implementation of VDI based Computer Laboratory in University Education System to Save Energy, Cost, and Adapt Technology Upgradation / M.A. Hossain et al // IJCSNS. 2020. Т. 20. №. 7. p. 130.
4. Проскурин Д.К., Маковий К.А. Задача выбора серверных ресурсов для внедрения инфраструктуры виртуальных рабочих столов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т.13. №4. С. 26-32.
5. Курейчик В.М. Модифицированные генетические операторы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 12(101). С. 7-14.
6. A comparison of linear programming and the genetic algorithm approaches to the problem of optimizing the server hardware resources for hosting virtual desktops / K.A. Makoviy, D.K. Proskurin, Y.V. Khitskova, Y.V. Metelkin // Journal of Physics: Conference Series: electronic edition. Samara, 2018. P. 012171.

Поступила 04.05.2021; принята к публикации 18.06.2021

Информация об авторах

Проскурин Дмитрий Константинович – канд. физ.-мат. наук, доцент, врио ректора, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

Маковий Катерина Александровна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: u00110@vgasu.vrn.ru

MODIFIED GENETIC ALGORITHM FOR SOLVING THE PROBLEM OF SELECTING SERVER RESOURCES IN BUILDING THE INFRASTRUCTURE OF VIRTUAL DESKTOPS

D.K. Proskurin, K.A. Makoviy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the transition to cloud technologies is accompanied by significant material costs for the formation of IT infrastructure. Using models that optimize hardware resources reduces hardware costs and increases the success of IT-

infrastructure projects. Client workspace virtualization is dramatically changing the way of interaction with end users and expanding the opportunities for digital transformation of the organization. The article presents a genetic algorithm for solving the problem of choosing hardware for the formation of virtualized desktops infrastructure. The mathematical model for the selection of server platforms and the amount of memory to place a given number of virtual machines with given requirements for RAM is a nonlinear integer programming problem that has no exact solution, therefore, for each such problem, various heuristic methods are selected that allow obtaining not exact, but a good enough solution in a reasonable amount of time. The proposed genetic algorithm uses a solution coding method that differs from the classical method and a directed mutation operator being developed. The use of an elitist strategy in conjunction with ranking selection, placing the "best" solution in the genetic bank allows one to solve the problem of getting into local optima and increases the convergence of the genetic algorithm

Key words: Virtual Desktop Infrastructure, genetic algorithm, elitist strategy, ranking selection

References

1. Rot A., Chrobak P. "Benefits, limitations and costs of IT infrastructure virtualization in the academic environment. Case study using VDI technology", ICSoft, 2018, pp. 738-745.
2. Chawla N., Kumar D. "Desktop virtualization—Desktop as a service and formulation of TCO with return on investment", Software Engineering, Springer, Singapore, 2019, pp. 599-608.
3. Hossain M.A., Reza M.T., Hossain N., Nashiry M.A., Shafiuzzaman, "Implementation of VDI based computer laboratory in university education system to save energy, cost, and adapt technology upgradation", *IJCSNS 20*, 2020, no. 7, pp. 130.
4. Proskurin D.K., Makoviy K.A. "The task of selecting server resources for virtual desktop infrastructure deployment", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol.13, no. 4, pp. 26-32.
5. Kureychik V. M. "Modified genetic operators", *Bulletin of Southern Federal University. Technical science (Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki)*, 2009, vol. 101, no. 12, pp. 7-14
6. Makoviy, K.A., Proskurin D.K., Yu.V. Khitskova, Metelkin Ya.V. "A comparison of linear programming and the genetic algorithm approaches to the problem of optimizing the server hardware resources for hosting virtual desktops", *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2018, vol. 1096, no. 1, p. 012171.

Submitted 04.05.2021; revised 18.06.2021

Information about the authors

Dmitriy K. Proskurin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Acting Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pdk@vgasu.vrn.ru

Katerina A. Makoviy, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh 394006, Russia), e-mail: u00110@vgasu.vrn.ru

АЛГОРИТМ ДЕТЕКЦИИ БУКВ И СТРОК НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ ТЕКСТОВ, НАБРАННЫХ ПЕЧАТНЫМ ШРИФТОМ БРАЙЛЯ**С.Ф. Якушева****Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия**

Аннотация: предложен простой алгоритм детекции букв и выделения строк на сканах и фотографиях текстов, набранных печатным шрифтом Брайля, при помощи оконных свёрток. Алгоритм изначально разрабатывался для автоматической и полуавтоматической разметки датасетов для обучения распознающих нейронных сетей со сложными архитектурами для существенного ускорения процесса подготовки данных. Он основан на специфичности этого шрифта, в котором каждая буква кодируется комбинацией выпуклых точек, расположенных в узлах прямоугольной решетки. Для распознавания букв используется оконный фильтр, подобранный для обнаружения пар букв в строке, с пороговым отсечением. Затем жадным алгоритмом выделяются центры пар соседних букв. Далее при помощи взвешенных расстояний для каждой точки ищутся две ближайшие и соединяются ребрами во вспомогательном графе. Точки, входящие в одну компоненту связности в этом графе, объединяются в строку и выравниваются для улучшения качества итогового распознавания. Обнаруженные буквы затем могут быть декодированы, например, при помощи классифицирующих нейронных сетей или других анализирующих алгоритмов, и переведены в текст в соответствии с положениями в распознанных строках. Алгоритм не накладывает очень жестких ограничений на входное изображение и допускает уточнение параметров в соответствии с форматом шрифта, однако он неустойчив к перспективным искажениям и сильным деформациям и требует дополнительных корректировок при распознавании участков текста с небольшим числом выпуклых точек. Метод хорошо подходит для сканированных изображений и в дальнейшем при помощи качественной предобработки может быть обобщен для работы с фотографиями

Ключевые слова: шрифт Брайля, алгоритм детекции, оконные свертки, распознавание

Памяти М.А. Ройтберга

Введение

Шрифт Брайля - рельефно-точечный тактильный шрифт, предназначенный для письма и чтения незрячими и плохо видящими людьми. Первоначально рельефные шрифты были военной разработкой и предназначались для чтения донесений в полной темноте, однако подобный способ коммуникации среди зрячих людей не прижился.

На данный момент перевод на обычный язык текста, набранного шрифтом Брайля, вызывает большие технические сложности. Лишь немногие здоровые люди умеют бегло читать этот шрифт, большинству же приходится переводить его побуквенно, разглядывая выпуклые точки на белом фоне. Разумеется, для этого требуется огромное количество времени и немалое зрительное напряжение.

Разработаны аппаратно-программные устройства для чтения машинописных текстов, однако они чрезвычайно дороги. Создание более дешевых и простых в использовании машин тормозится из-за отсутствия коммерче-

ского интереса. Тем не менее, разработаны программы, переводящие текст с фотографий или отсканированных изображений. Многие из них используют алгоритмические подходы, например, вычисление координат строк и столбцов на изображении с последующим построением сетки и выделением символов шрифта [4]. Разработаны и несколько отечественных систем распознавания, в том числе рукописных текстов на Брайле [1]. Большинству из них требуются жёсткие ограничения на входной формат, например, строгое соответствие размеров, идеальное выравнивание строк или столбцов.

К задаче распознавания подобных изображений можно применять методы машинного обучения. Задача классификации букв, написанных шрифтом Брайля, успешно решена при помощи простых моделей нейронных сетей [7]. Однако большую проблему представляет задача детекции букв на изображении: в общем случае оно может быть деформировано и зашумлено. К тому же, в процессе письма могут нарушаться выравнивание букв, межбуквенные и междустрочные расстояния. Для применения метода “обучение с учителем”

потребуется огромный разнообразный размеченный датасет, размеры которого для получения хорошего итогового качества должны достигать десятков и сотен тысяч, а то и миллионов обучающих примеров. Модели сетей, применяемые для решения задачи детекции, как правило, очень сложны и громоздки, а для их обучения требуются большие вычислительные мощности [5]. Поэтому оптимальным решением было бы применение вычислительно дешёвых алгоритмических методов. Стоит заметить, что такие методы могут быть применены для подготовки размеченных датасетов для обучения нейросетей, поскольку сети могут быть более универсальными и помехоустойчивыми детекторами.

Теоретический анализ

Оконный фильтр представляет собой матрицу размера n на m . Фильтр вычисляется по окну на изображении следующим образом:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(x+i, y+j) \cdot \alpha(i, j)$$

где $p(x, y)$ - значение пикселя с координатами (x, y) , $\alpha(i, j)$ - коэффициент фильтра. Таким образом, вычисляется новая матрица меньшего размера.

Подобного рода фильтры (обучаемые свёртки) используются в свёрточных нейронных сетях для выделения на изображениях значимых признаков.

$$D(A, B)(r, s) = \max_{j, k \in B} (A(r-j, s-k) + B(j, k))$$

$$E(A, B)(r, s) = \max_{j, k \in B} (A(r+j, s+k) - B(j, k))$$

Здесь A — изображение, B — структурный элемент (например, круг или квадрат). Комбинация этих операций применяется для устранения шумов с бинаризованных изображений [2,3]. Метод RANSAC [6] применяется при оценке параметров модели на зашумленной выборке. Анализируются произвольные подмножества точек выборки, на них строятся модели, а затем проверяется соответствие им всей выборки. Достоинством алгоритма является надёжность даже при работе с большим

числом выбросов в данных. В данной работе метод применялся для спрямления строк, поскольку центры распознанных букв довольно часто «съезжали».

Методика

В данном исследовании предложен простой алгоритм детекции букв и выделения строк на сканах и фотографиях текстов, набранных печатным шрифтом Брайля (рис. 1), который затем может быть дополнен классификацией букв, например, при помощи нейронных сетей [7]. Декодированные таким образом буквы затем могут быть переведены в читаемый текст.

1) Предобработка.

Входное изображение переводилось в чёрно-белое. Для выделения точек применялся медианный фильтр. Затем производилась адаптивная бинаризация. После бинаризации «белым» пикселям присваивалось значение 1, «чёрным» - -1.

Для удаления шума использовались морфологические операции dilation (для удаления мелких точек, возникших из-за шума) и erosion (увеличение оставшихся точек) [2], [3].

Все изображения были предварительно обрезаны (задачи выделения текста на странице, удаления краев листа и других искажений не входили в данное исследование).

2) Распознавание букв.

Данный этап является наиболее сложным. Поскольку изображения редко бывают идеально ровными, применение стандартных методов, например, преобразования Хафа для выделения прямых линий [3] не дает удовлетворительных результатов. И если повороты и проективные искажения можно устранить алгоритмическими методами, выравнивание букв относительно друг друга - задача крайне трудоемкая.

Для выделения букв применялся оконный фильтр. Для стандартизации вычисленные значения фильтра на картинке центрированием и нормированием переводились в диапазон [0,1].

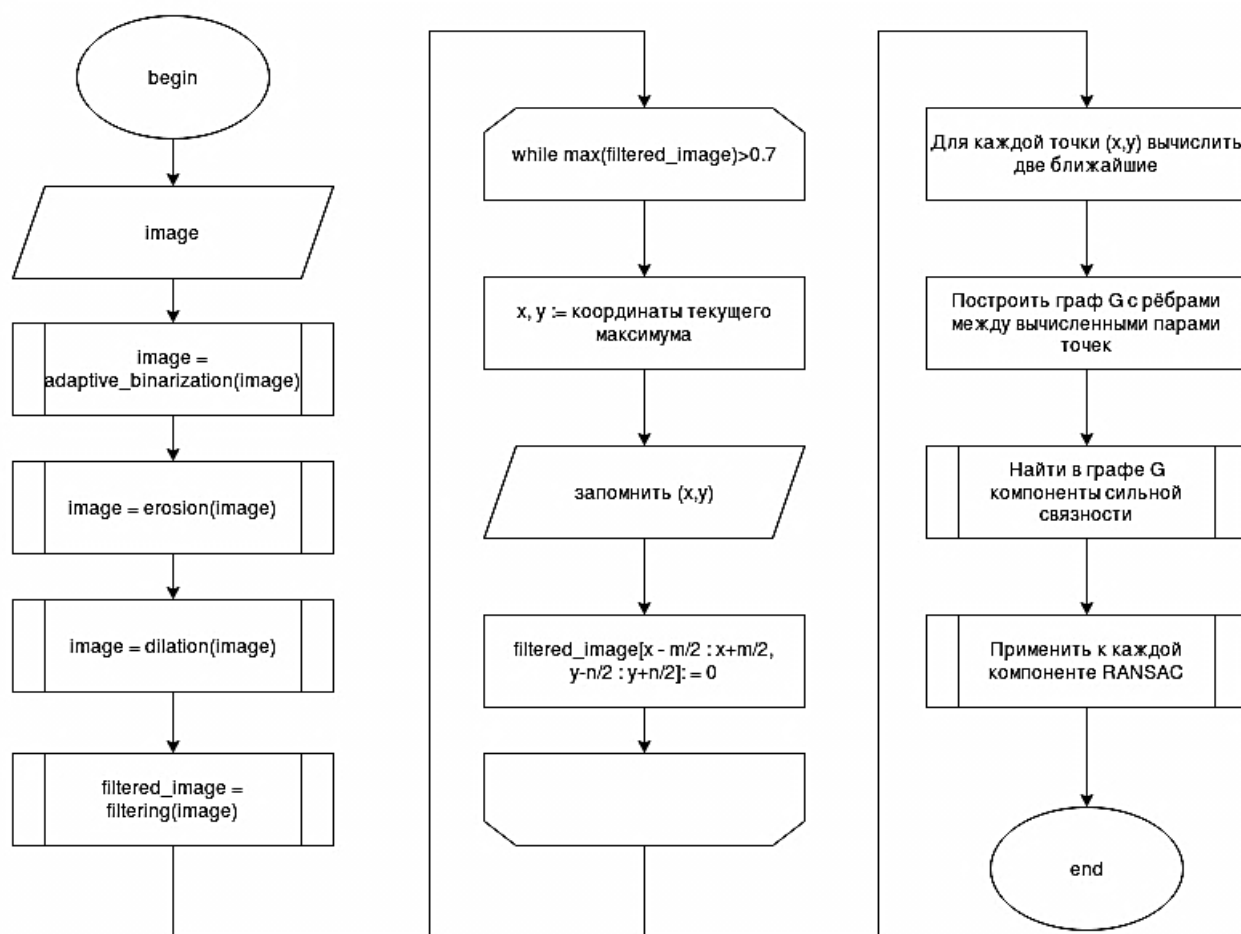


Рис. 1. Алгоритм детекции

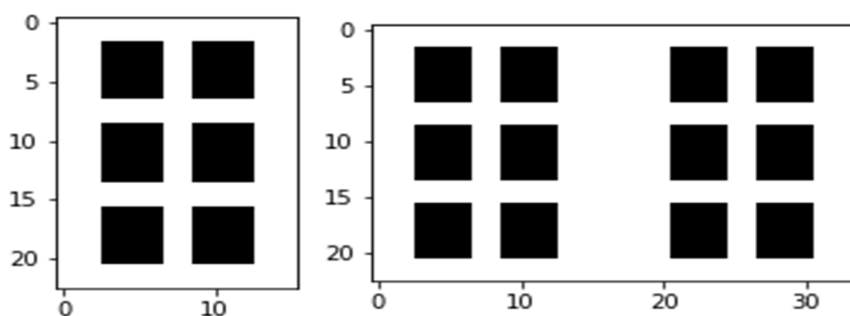


Рис. 2. Простой и двоянный фильтры. Значения в белых пикселях равны 1, в чёрных -2

Для распознавания отдельных букв применялся фильтр (рис. 2), пропорции которого выбирались в соответствии с требованиями ГОСТ. Значения в чёрных пикселях равнялись -2, в белых 1. Поскольку на этапе предобработки в морфологических операциях использовались квадраты, точки после предобработки были похожи на прямоугольники, поэтому в фильтре также использовались прямоугольные области. Параметры фильтра (размеры точек и

расстояния между ними) могут быть скорректированы в соответствии с форматом используемого шрифта. При точном подборе размеров фильтр очень хорошо распознавал буквы с большим числом точек, однако буквы с небольшим числом точек часто распознавались неправильно и “сезжали” со строк.

При внимательном рассмотрении текстов можно заметить, что очень часто буквы с малым числом точек соседствуют с буквами из

большого числа точек. Поэтому использовался “сдвоенный” фильтр (2), пропорции которого также выбирались в соответствии с ГОСТ.

Алгоритм выделения точек (центров пар соседних букв) выглядел следующим образом:

- 1) выбираем пиксель с наибольшим значением фильтра;
- 2) запоминаем его координаты;
- 3) зануляем область размера $2m \times 2n$ центром в этом пикселе, где m, n - размеры используемого фильтра;
- 4) повторяем предыдущие шаги, пока значение максимума не станет меньше 0.7.

Предложенный алгоритм является “жадным”. Однако вероятность того, что точка с наибольшим на всей картинке значением фильтра не окажется центром пары букв весьма мала, поэтому возникновение ошибок на начальных итерациях маловероятно.

Порог 0.7 был выбран эмпирически. При его снижении возрастает вероятность ложноположительных срабатываний алгоритма (выделение пустых областей).

После этого этапа каждую детектированную букву можно напрямую перевести в букву обычного шрифта и нанести на изображение. В этом случае даже при отсутствии полного перевода у пользователя будет возможность хотя бы частично прочитать запись.

3) Выделение строк и слов.

После выделения отдельных букв или пар букв координаты их центров отмечались. Затем каждый центр соединялся с двумя ближайшими к нему. Использовалось взвешенное расстояние $d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + 10(y_1 - y_2)^2}$, где (x_1, x_2) - координаты первой точки, (y_1, y_2) - координаты второй точки, коэффициент 10 был подобран эмпирически, для избегания соединения точек из разных строк. В получившемся графе соединенных между собой точек находились компоненты связности, каждая компонента соответствовала слову или полной строке.

Полученные строки затем могут быть соотнесены друг с другом, например, сортировкой координат самых левых точек каждой строки, для перевода в полноценный текст.

4) Выравнивание строк.

Поскольку некоторые выделенные точки могут “съехать” со строки (например, если в обеих буквах отсутствовали нижние точки), для выравнивания использовался алгоритм RANSAC поиска наилучшей прямой [6]. Он применялся к каждой выделенной компоненте. При завершении без ошибок выполнения некоторые смещенные точки выравнивались.

Результаты и их обсуждение

На изображениях ниже представлен поэтапно весь процесс работы алгоритма. Для примера использовался скан текста (рис. 3).

На рисунке: вверху слева изображение до обработки, справа — изображение после бинаризации и применения морфологических фильтров. Внизу: слева — задетектированные пары букв после применения фильтра, справа — задетектированные пары после выравнивания строк.

Также алгоритм был опробован на фотографиях с заметными искажениями (рис. 4).

Если не принимать во внимание сложности в предобработке распознаваемых изображений, основным недостатком предложенного алгоритма являются ошибки при детектировании пар букв с небольшим числом точек. Частично этот недостаток был устранен при помощи дополнительного выравнивания, однако из-за особенностей используемой реализации алгоритма RANSAC в стандартной библиотеке языка Python 3 этот метод часто не срабатывал на коротких строках. В дальнейшем возможна адаптация алгоритма для работы с небольшим числом точек.

Также недостатками данного метода является необходимость подбора размера фильтров и неустойчивость к существенным перспективным искажениям. При таких искажениях буквы на изображении имеют разные размеры, и, соответственно, должны распознаваться несколькими фильтрами разных размеров. Однако алгоритм хорошо подходит для обработки сканированных изображений, поскольку на них подобные эффекты сведены к минимуму, а размер шрифта фиксирован по отношению к размерам сканирующего устройства, и поэтому размеры и пропорции используемого фильтра можно подобрать заранее.

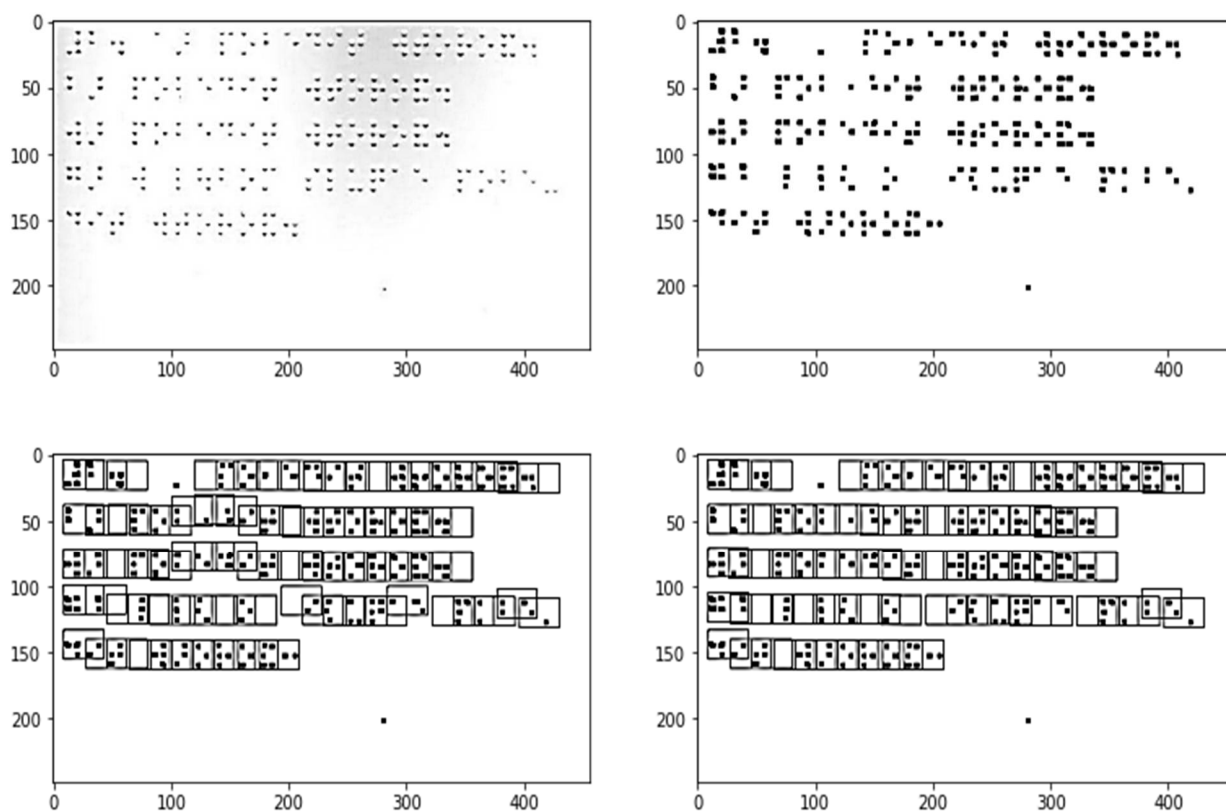


Рис. 3. Алгоритм преобразования изображения пошагово

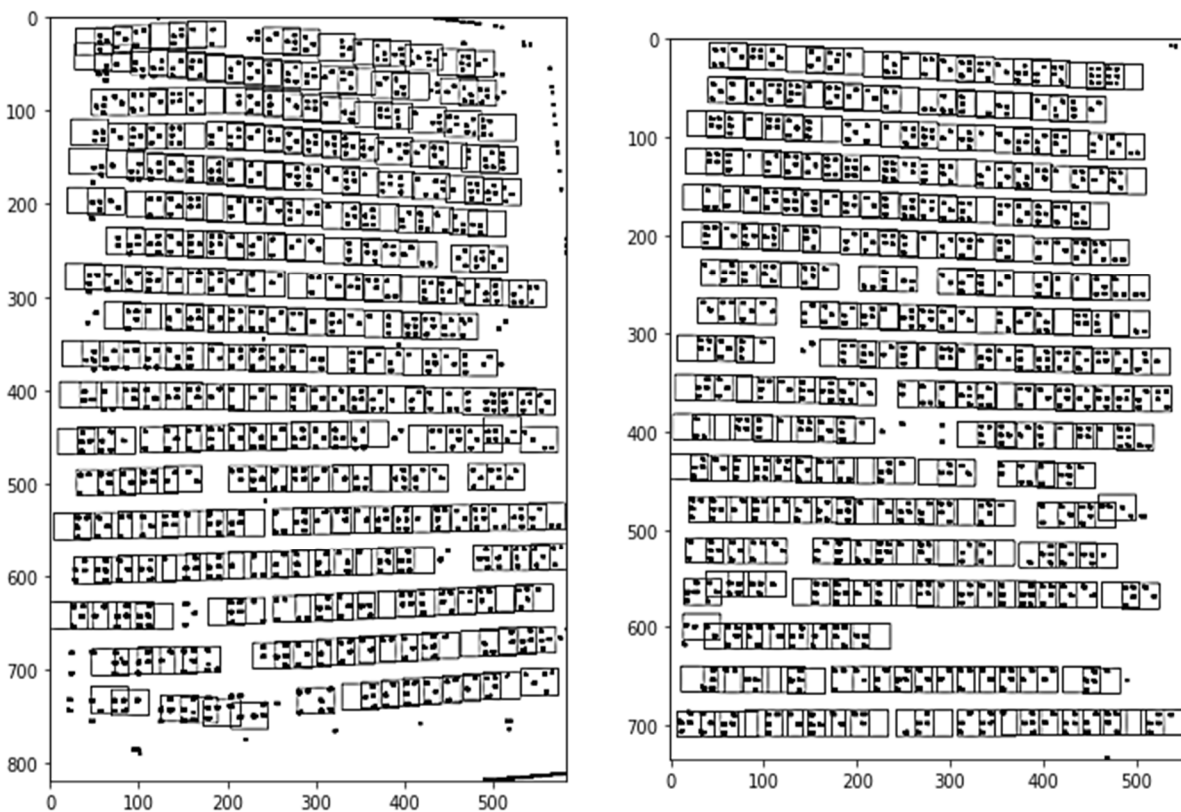


Рис. 4. Результаты работы алгоритма на фотографиях с искажениями

Заключение

1. В работе предложен метод детекции букв и строк в текстах, набранных печатным шрифтом Брайля.

2. Показано, что данный метод может быть применен для автоматической и полуавтоматической разметки датасетов для обучения сложных распознающих нейронных сетей, более устойчивых ко всякого рода искажениям, шумам и деформациям. Основной проблемой при составлении таких обучающих датасетов является необходимость ручной разметки, что требует внушительных трудозатрат. Алгоритм позволяет сократить время разметки и уменьшить ее итоговую стоимость.

3. Изложенный метод подходит для обработки сканированных изображений, поскольку на них фиксирован размер шрифта.

4. В дальнейшем возможно дополнение алгоритма автоматическим подбором размеров фильтра (например, через алгоритмическую оценку среднего расстояния между парами ближайших точек), использованием фильтров нескольких размеров, а также улучшение и проработка подготовительного этапа. Например, в предобработку стоит включить устранение перспективных искажений, удаление краев листа и поворот изображения при необходимости, устранение различных шумов, линий и пятен (например, рукописных пометок).

Литература

1. Соловьева Е.А., Луняков Б.И. Программный модуль распознавания рукописного шрифта Брайля // *Безопасные информационные технологии: сб. науч. тр. VIII всерос. науч.-техн. конф. М.: Из-во Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2017. С. 438-443.*
2. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
3. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
4. Isayed S., Tahboub R. A review of optical Braille recognition // *2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN). Sousse. 2015. pp. 1-6. URL: https://www.researchgate.net/publication/277331678_A_Review_of_Optical_Braille_Recognition*
5. Application of Deep Learning to Classification of Braille Dot for Restoration of Old Braille Books /H. Kawabe, Y. Shimomura, H. Nambo, S. Seto // *Proceedings of the Twelfth International Conference on Management Science and Engineering Management. 2019. Springer International Publishing. P. 913-926. URL: <https://www.researchgate.net/publication/325997935>*
6. Martin A. Fischler, Robert C. Bolles. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // *Comm. Of the ACM. 1981. Vol. 24. P. 381—395. doi:10.1145/358669.358692.*
7. Mohammed Waleed. Braille Identification System Using Artificial Neural Networks // *Tikrit Journal of Pure Science. 2017. № 22 (2). URL: <http://tjps.tu.edu.iq/index.php/j/article/view/520>*

Поступила 29.03.2021; принята к публикации 18.06.2021

Информация об авторах

Якушева Софья Федоровна - магистрант кафедры алгоритмов и технологий программирования Физтех-школы прикладной математики и информатики, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9), e-mail: yakusheva.sf@phystech.edu, тел. +7(968)0382148

LETTER AND LINE DETECTION ALGORITHM IN TEXT IMAGES TYPED BY PRINTED BRAILLE FONT

S.F. Yakusheva

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

Abstract: the article gives a simple algorithm for detecting letters and highlighting lines on scans and photographs of texts typed in braille using window convolutions. The algorithm was originally developed for automatic and semi-automatic marking of datasets for training recognizing neural networks with complex architectures to significantly speed up the data preparation process. It is based on the specificity of this font, in which each letter is encoded by a combination of uplifted points located at the nodes of a rectangular lattice. For letter recognition, a window filter is used, matched to detect pairs of letters in a line, with a threshold cutoff. Then the centers of pairs of adjacent letters are allocated by a greedy algorithm. Next, using the weighted distances for each point, the two nearest are searched and connected by edges in an auxiliary graph. Points included in one connected component in this graph are combined into a line and aligned to improve the quality of the final recognition. The detected letters can then be decoded, for example, using classifying neural networks or other analyzing algorithms, and translated into text according to the positions in the recognized strings. The algorithm does not impose strict restrictions on

the input image and allows the parameters to be refined in accordance with the font format; however, it is unstable to perspective distortions and strong deformations and requires additional adjustments when recognizing areas of text with a small number of uplifted points. The method is well suited for scanned images and, with the help of high-quality preprocessing, can be generalized to work with photographs

Key words: Braille, detection algorithm, convolutions, recognition

References

1. Solov'eva E.A., Lunyakov B.I. "Braille handwriting recognition software module", *Proc. of The Eighth All-Russian Scientific and Technical Conf. of NUK "Informatics and control systems": Secure Information Technology (Bezopasnye informatsionnye tekhnologii: sb. nauch. tr. Vos'moy vseros. nauch.-tekhn. konf. NUK «Informatika i sistemy upravleniya»)*, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2017, pp. 438-443.
2. Foresyth D., Ponce J. "Computer vision: modern approach" ("Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podkhod"), Moscow, Williams, 2004, 928 p.
3. Shapiro L., Stockman D. "Computer vision" ("Komp'yuternoe zrenie"), Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2006, 752 p.
4. Isayed S., Tahboub R. "A review of optical Braille recognition", *2nd World Symposium on Web Applications and Networking (WSWAN)*, Sousse, 2015, pp. 1-6? available at: https://www.researchgate.net/publication/277331678_A_Review_of_Optical_Braille_Recognition
5. Kawabe H., Shimomura Y., Nambo H., Seto S. "Application of deep learning to classification of Braille dot for restoration of old Braille books", *Proc. of the Twelfth International Conference on Management Science and Engineering Management*, 2019. Springer International Publishing, pp. 913-926, available at: <https://www.researchgate.net/publication/325997935>
6. Fischler M.A., Bolles R.C. "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography", *Comm. Of the ACM: journal*, 1981, vol. 24, pp. 381-395, doi:10.1145/358669.358692.
7. Waleed M. "Braille identification system using artificial neural networks", *Tikrit Journal of Pure Science*, 2017, vol. 22 (2), available at: <http://tjps.tu.edu.iq/index.php/j/article/view/520>

Submitted 29.03.2021; revised 18.06.2021

Information about the author

Sophia F. Yakusheva, MA, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), (9 Institutsky Pereulok, Dolgoprudny 141701, Moscow Region, Russia), e-mail: yakusheva.sf@phystech.edu

РЕШЕНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДКОЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛИССАДНОГО ЛАЗЕРНОГО МАЯКА

Д.А. Смирнов¹, В.Г. Бондарев², А.В. Тепловодский¹, А.В. Николенко², К.В. Николенко³

¹Государственный летно-испытательный центр имени В.П. Чкалова, Войсковая часть 15650, г. Ахтубинск, Россия

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

³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описана проблема существующих методов определения координат на этапе посадки летательного аппарата, которые имеют либо низкую точность, либо для реализации необходимо сложное оборудование. Поэтому были представлены особенности использования системы обеспечения посадки летательного аппарата с применением глиссадного лазерного маяка. Для осуществления посадки по лазерному глиссадному маяку необходимо дооборудование летательного аппарата системой технического зрения с помощью, с которой возможна автоматизация управления. В этом случае система технического зрения в полёте получает навигационную информацию о движении летательного аппарата в реальном масштабе времени. Осуществление посадки по лазерному маяку представлено путем математического моделирования процесса посадки по предложенному закону управления. Результаты моделирования показывают, что в конечной точке (точка касания взлетно-посадочной полосы) изменение высоты полета происходит плавно, что обеспечивает «мягкую» посадку. Движение осуществляется не по прямой, а по линии, близкой к экспоненте. Ввиду того, что работа с лазерными системами навигации оказывает воздействие на организм человека, был предложен безопасный способ использования данной системы и произведен расчет надежности функционирования. Предложенная система может быть применена на аэродромах любого класса и различных типах летательных аппаратов, на которых может быть установлено фотоприемное устройство и имеется система автоматического управления полетом в режиме посадки

Ключевые слова: летательный аппарат, посадка, система технического зрения, глиссадный лазерный маяк, надежность системы, обеспечение безопасности, математическое моделирование, лазерное излучение, взлетно-посадочная полоса

Введение

Наиболее сложными ответственными этапами с точки зрения пилотирования, а также автоматизации для летательного аппарата (ЛА) остаются выполнение предпосадочного маневра и заход на посадку. Данный этап полета характеризуется скоротечностью, резкими психофизиологическими нагрузками, а также быстрыми изменениями режимов полетов [1].

Посадка ЛА происходит в различных атмосферных условиях (дождь, туман, град и т.д.), что усложняет летчику выполнение данного этапа. От того как пройдет посадка ЛА зависит насколько оперативно инженерно-технический состав подготовит ЛА к повторному полету. В связи с этим специалисты в области навигации на протяжении уже многих лет ведут поиски и разрабатывают новые схемы, способы и средства посадки ЛА.

В настоящее время применяемые неавтоматические способы посадки ведут за собой большое количество авиационных происшествий, которые в основном заканчиваются потерями ЛА. Основным препятствием для автоматизации режима посадки является отсутствие удовлетворительных способов измерения положения ЛА. Все существующие методы определения координат, исходя из статистики либо имеют низкую точность, либо для реализации необходимо сложное оборудование. Поэтому применение системы управления посадкой ЛА с применением глиссадного лазерного маяка (ГЛМ) является актуальной задачей.

Весьма эффективным решением этой проблемы в настоящее время является дооборудование ЛА системой технического зрения (СТЗ), с помощью которой возможна автоматизация управления ЛА. В этом случае СТЗ в полете получает навигационную информацию движения ЛА в реальном масштабе времени. СТЗ совместно с элементами искусственного интеллекта и автоматическими системами управле-

ния транспортным средством позволят существенно снизить аварийность на транспорте. Широкое распространение получили такие системы совместно с применением лазерных технологий.

Такие характеристики лазера, как малая расходимость луча, высокая спектральная плотность излучения, когерентность позволяют применить его для решения навигационных задач.

Постановка и решение задачи

За последнюю четверть века достигнуты большие успехи в освоении инфракрасного диапазона спектра электромагнитных колебаний. Разработаны новые источники излучения инфракрасных лучей, высокочувствительные приемники лучистой энергии, приборы для спектрального анализа и разнообразная аппаратура, применяемая в промышленности, научных исследованиях и в военной технике.

Несмотря на то, что инфракрасные приборы отличаются простотой устройства, малыми габаритами и весом, надежностью, а также скрытностью действия и высокой разрешающей способностью, развитие инфракрасной техники происходило гораздо медленнее по сравнению с радиолокацией. Объясняется это ограничениями в применении инфракрасных приборов, связанными с поглощением теплового излучения в атмосфере и с влиянием отраженной от фона солнечной радиации. Усовершенствование инфракрасной аппаратуры за счет использования новых типов приемников излучений и различных методов фильтрации расширяет возможности применения инфракрасных устройств, особенно на больших высотах и в космическом пространстве.

В ГЛМ в качестве источников излучения предлагается использовать полупроводниковые инжекционные лазеры, которые обладают прямой токовой накачкой, имеют высокий КПД, а также являются компактными и экономически выгодными. Но для того, чтобы использовать данные лазеры в ГЛМ необходимо повысить надежность данной конструкции. Поэтому необходимо произвести расчет показателей надежности для периода нормальной эксплуатации системы. Для проведения расчета безопасности элементов применяют количественные характеристики.

К количественным характеристикам относятся:

- средняя наработка до отказа;

- вероятность безотказной работы;
- вероятность отказа;
- интенсивности отказов.

Для определения этих показателей необходимо провести испытания $N(0)$ исправных элементов (однотипных) в одинаковых условиях.

В ходе испытаний один элемент откажет через интервал t_1 , другой через t_2 , i -й элемент через интервал t_i и так далее. Элементы, которые отказали в процессе, не заменяются на исправные. Все значения наработки отображаются документально. При обработке результатов испытаний время их проведения разбивают на одинаковые интервалы Δt .

Для каждого k -го интервала Δt определяют:

$n_k(\Delta t)$ – число отказавших элементов в k -м интервале;

$\Delta t_i N(t_k)$ – число исправных элементов, оставшихся к началу рассматриваемого k -го интервала Δt , то есть к моменту $t_k = (k-1)\Delta t$, где $k = 1, 2, 3, \dots$;

$n(t_k)$ – число отказавших элементов за время t_k .

Показатели безотказности элементов определяются в соответствии с нижеперечисленными формулами.

Вероятность отказа элементов за время t_k :

$$q(t_k) = \frac{h(t_k)}{N(0)}. \quad (1)$$

Вероятность безотказной работы элементов за время t_k :

$$P(t_k) = e^{-\lambda(t_k)}. \quad (2)$$

Интенсивность отказов элементов в момент t_k :

$$\lambda(t_k) = \sum \lambda(t_k), \quad (3)$$

где $\lambda(t_k)$ – суммарная интенсивность отказов блока.

Если для каждого i -го элемента в процессе испытаний зафиксирована наработка t_i отказа, то средняя наработка до отказа определяется по формуле

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}. \quad (4)$$

Вероятность $q(t)$ отказа элемента есть вероятность того, что в пределах заданной наработки t возникнет отказ элемента, а вероятность $P(t)$ безотказной работы – вероятность того, что за время t отказа элемента не произойдет. В теории вероятностей говорится, что точность определения статистическим путём значений

$q(i)$ и $p(i)$ выше, чем больше число $N(0)$ испытываемых элементов.

Вероятность $p(t)$ безотказной работы может характеризовать как множество элементов, так и один элемент из данного множества. Поэтому для нахождения совокупности $N(0)$ элементов физический смысл вероятности безотказной работы сводится к ожидаемому числу $N(0)p(t)$ элементов. Такие элементы могут проработать безотказно в течение времени t . Чем больше $N(0)$, тем точнее количество не отказавших на практике элементов совпадает с ожидаемым значением $N(0)p(t)$. Применительно к одному элементу величина $p(t)$ определяет

факт наличия $100p(t)$ шансов из 100 возможных того, что элемент не откажет за время t .

Смысл вероятности $q(t)$ отказа заключается в ожидаемом числе $N(0)q(t)$ элементов, которые могут отказать за время t . По отношению к одному элементу $q(t)$ означает наличие $100q(t)$ шансов из 100 возможных, что он откажет за время t . Поскольку за время наработки t каждый элемент либо откажет, либо нет, то справедливо равенство

$$p(t) + q(t) = 1. \quad (5)$$

Исходные данные для расчёта определяем и заносим в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета вероятностей отказа элемента и его безотказной работы

п/п	Наименование элементов				n_{i2} шт.
1	Конденсатор	7	0,042	0,294	1
2	Микросхема	2	0,03	0,06	2
3	Резистор	16	0,01	0,16	3

Определим показатели надёжности для 200, 500 и 1000 часов работы.

Интенсивность отказа системы:

$$\lambda = 10^{-6}(0,294 + 0,06 + 0,16 + 0,0001 + 0,22 + 0,625) = 1,3591 \times 10^{-6}.$$

Вероятность безотказной работы при 200 часах: $P(t) = e^{-1,3591 \cdot 10^{-6} \cdot 200} = 0,9972$; вероятность безотказной работы при 500 часах:

$P(t) = e^{-1,3591 \cdot 10^{-6} \cdot 500} = 0,9932$; вероятность безотказной работы при 1000 часах:

$P(t) = e^{-1,3591 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = 0,9865$; вероятность отказа при 200 часах: $f(t) = 1 - P(200) = 0,0028$; вероятность отказа при 500 часах:

$f(t) = 1 - P(500) = 0,0068$; вероятность отказа при 1000 часах: $f(t) = 1 - P(1000) = 0,0135$.

Среднее время безотказной работы

$$T_{cp} = \frac{1}{1,3591 \cdot 10^{-6}} = 735781 \text{ часов.}$$

Данные показатели надёжности работы были получены для идеального случая. Но в реальных условиях работы они ниже, так как на работу системы будут влиять различные виды возмущений.

Для проверки работоспособности системы управления посадкой ЛА с применением ГЛМ необходимо составить модель движения ЛА в режиме посадки. Для упрощения расчетов сделаем следующие допущения:

- рассмотрим движение ЛА только в вертикальной плоскости, поскольку контур управ-

ления в вертикальной плоскости на этапе посадки при удалении от взлетно-посадочной полосы (ВПП) менее чем на 2000 м играет основную роль в связи с тем, что ЛА приближается к линии заданного пути;

- скорость ЛА на этом этапе будем считать неизменной и равной посадочной скорости (для нашего случая будем считать 80 м/с);

- турбулентностью атмосферы в районе ВПП пренебрегаем, так как предполагается наличие контура демпфирования по тангажу.

С учетом принятых допущений модель продольного движения ЛА будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \omega_z - C_4 \cdot \alpha - C_9 \cdot (\delta_{\delta 0} + \delta_e); \\ \dot{\omega}_z = -C_1 \cdot \omega_z - C_5 \cdot \dot{\alpha} - C_2 \cdot \alpha - C_3 \cdot (\delta_{\delta 0} + \delta_e); \\ \dot{V}_y = C_6 \cdot (\omega_z - \dot{\alpha}); \\ \dot{H} = V_y; \\ \dot{\delta}_{\delta 0} = -\delta_{\delta 0} + \mu_z \cdot \dot{\omega}_z; \\ \dot{\delta}_e = -\frac{\delta_e}{T} + \frac{v_{ny}}{T} \left[-\frac{\dot{V}_y}{g} + i \cdot (H_{зад} - H_{мек}) - \mu \cdot V_y \right], \end{cases} \quad (6)$$

где α – угол атаки, рад; ω_z – угловая скорость тангажа, рад/с; V_y – вертикальная скорость полета; H – высота ЛА; $\delta_{\delta 0}$ – демпфирующая составляющая управления рулем высоты; δ_e – сигнал управления рулем высоты по перегрузке; μ_z, μ, v_{ny}, T – коэффициенты контуров управления; $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ и C_9 – аэродинамические коэффициенты, зависящие от типа и режима полета ЛА.

Начальные условия для всех параметров, кроме высоты полета – нулевые. Высоту полета примем равной 100 м, удаление до ВПП примем 2000 м. Это означает, что самолет, находясь на высоте 100 м с посадочной скоростью

80 м/с, должен достичь точки касания ЛА с ВПП через 25 сек. Для указания заданного случая и самолетов компании «МиГ» последних поколений коэффициенты модели принимают значения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты модели продольного движения самолета типа МиГ-31

Коэф.	V	H	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_9	μ_z	μ	v_{ny}	T	g
Знач.	80	0	1,8	22,065	68,76	1,92	1,1174	4,751	0,26	0,2	0,05	1,8	0,7	9.81

Заданная высота полета $H_{зад}$ на ЛА в простейшем случае рассчитывается в продольной плоскости в зависимости от рассогласования измеренного угла на ГЛМ $\varepsilon_{тек}$ и заданного ε_r :

$$H_{зад} = H \cdot \frac{tg\varepsilon_r}{tg\varepsilon_{тек}}. \quad (7)$$

Заданная высота полета определяется по измеренной текущей высоте полета и измеренному углу на глассадный лазерный маяк. При равенстве заданного угла глассады и текущего заданная высота полета равна текущей высоте. Однако, поскольку на борту ЛА имеется информация о горизонтальной дальности до ГЛМ, имеется возможность получения более плавной траектории посадки путем применения хранящейся в памяти бортового вычислителя информации о заданной высоте полета для каждой горизонтальной дальности до ГЛМ.

При моделировании применялась упрощенная формула, соответствующая формуле (2), где $tg\varepsilon_{тек}$ заменялся отношением текущей высоты полета к горизонтальной дальности до ГЛМ.

$$tg\varepsilon_{тек} = \frac{H}{x_l}. \quad (8)$$

При подстановке формулы (3) в (2) получаем закон управления для моделирования полетом:

$$H_{зад} = x_l \cdot tg\varepsilon, \quad (9)$$

А x_l может быть вычислена по упрощенной формуле, исходя из посадочной скорости, и оставшемся времени посадки:

$$H_{зад} = V_{нос} \cdot (T_n - t) \cdot tg\varepsilon. \quad (10)$$

Уравнения движения (1) решались методом Рунге-Кутта 4-го порядка с адаптивным шагом. Использовалась стандартная программа Mathcad. Результаты моделирования системы посадки приведены на графике зависимости высоты полета от времени посадки (рис. 1).

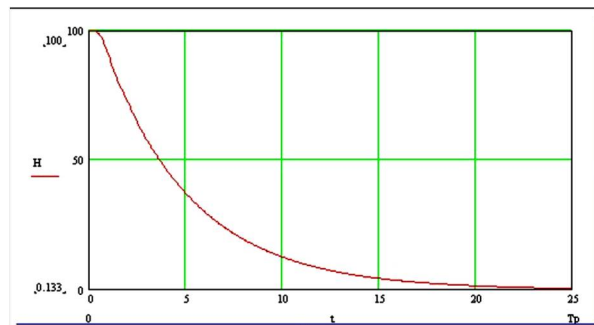


Рис. 1. Зависимость высоты полета от времени в режиме посадки

Таким образом, результаты моделирования показывают, что в конечной точке (точка касания ВПП) изменение высоты полета происходит плавно, что обеспечивает «мягкую» посадку. Движение осуществляется не по прямой, а по линии, близкой к экспоненте. Энергичное маневрирование осуществляется на начальном этапе при попадании ЛА в зону действия ГЛМ. Изменения угла атаки, вертикальной скорости полета и управляющих воздействий не выходят за пределы допустимых значений.

При этом, при работе с лазерными системами навигации возможно облучение людей и, как следствие, изменения в их зрительном анализаторе, а также возможны функциональные изменения в организме. Поэтому при работе оптико-электронных систем с лазерным пучком возникает необходимость разработки требований к мощности излучения в импульсе, а также минимально допустимых расстояний, при которых воздействие проблесков излучения не приводит к каким-либо изменениям в организме. Минимально допустимые расстояния, определенные на основании нормативных документов по санитарной безопасности при работе с источниками когерентного излучения, приведены в табл. 3. Нормы предельно допустимых уровней лазерного излучения, разработанные авторами Американского национального стандарта, близки к отечественным для данного диапазона длин волн.

Таблица 3

Предельно допустимые уровни лазерного излучения, определенные на основании нормативных документов по санитарной безопасности при работе с источниками когерентного излучения

λ , мкм	Предельно допустимые уровни лазерного излучения, Вт/см ² , на роговице глаза для различной длительности проблеска $\tau_{пр}$, с			
	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
0,63	10 ⁻²	3 · 10 ⁻³	2 · 10 ⁻³	9 · 10 ⁻⁴

Плотность мощности лазерного излучения, падающего на роговицу глаза, с учетом допущений определяется выражением

$$P = \frac{P_o e^{-\alpha L}}{S}, \quad (11)$$

где P_o – мощность излучения лазера, Вт; S – площадь пятна лазерного пучка в месте приема, м²; α – коэффициент ослабления атмосферы; L – дистанция, м.

Проведем расчет для чистой атмосферы, то есть примем, что ослабление излучения мало. Тогда данное выражение запишется как

$$L = \sqrt{\frac{4P_o}{\pi} \cdot \frac{1}{P \cdot \beta_n^2}}, \quad (12)$$

где β_n – расходимость лазерного пучка.

Тогда для предлагаемого типа лазеров получим следующую зависимость, представленную на рис. 2. Цифрами 1, 2, 3 обозначены зависимости для лазеров мощностью излучения соответственно 75, 50, 25 Вт.

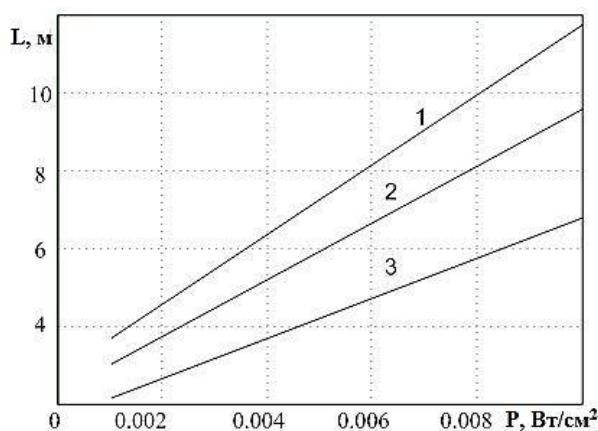


Рис. 2. Зависимость плотности мощности лазерного излучения от расстояния до объекта

Выводы

Полученные результаты показывают, что применение предлагаемой оптико-электронной системы в области навигации не представляет опасности для зрительного анализатора человека в радиусе порядка 10 м, опасность может быть лишь для персонала, обслуживающего предлагаемую систему. При использовании же большего расстояния воздействие излучения не ведет к каким-либо функциональным или органическим изменениям в организме.

ГЛМ необходимо устанавливать на определенном расстоянии от ВПП. Сектор с углом 30° размером 15 м должен иметь ограждение с предупреждающей надписью «Осторожно, лазерное излучение».

При эксплуатации особое внимание персонала следует обратить на недопустимость наблюдения лазера со стороны излучателя.

При этом установка ГЛМ требует его настройки для определенного аэродрома. Место установки определяется с помощью геодезической привязки к местности, относительно точки касания ВПП. При установке необходимо учитывать превышение точки установки над уровнем ВПП, линию заданного пути, направление посадки. Основание маяка должно быть достаточно массивным и обеспечивать компенсацию вибраций грунта, а также исключать какие-либо перемещения. Конструкция маяка должна предусматривать регулировку направления излучения лазера в диапазоне 1°–7° в вертикальной плоскости, ±6° от линии заданного пути в горизонтальной плоскости. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность регулирования угла расходимости луча в тех же пределах.

Таким образом, представлены особенности использования системы обеспечения посадки ЛА с применением ГЛМ. Возможность осуществления посадки по лазерному маяку продемонстрирована путем математического моделирования процесса посадки по предложенному закону управления. Расчет надежности функционирования и безопасности использования данной системы позволяют сделать вывод о том, что ее применение позволит автоматизировать процесс посадки ЛА до точки касания ВПП, повысить точность выдерживания глиссады и тем самым повысить безопасность полетов на этапе посадки.

Предложенная система может быть применена на аэродромах любого класса и различных типах ЛА, на которых может быть установлено

фотоприемное устройство и имеется система автоматического управления полетом в режиме посадки. Применение системы не исключает, а дополняет радиотехнические средства обеспечения посадки. Особенно эффективно система может быть для дистанционно-пилотируемых и беспилотных ЛА.

Литература

1. Белгородский С.Л. Автоматизация управления посадкой самолета. М.: Издательство «Транспорт», 1972. 352 с.
2. Бондарев В.Г. Автоматическая посадка летательных аппаратов // Авиакосмическое приборостроение. 2011. №3. С.21-26.
3. ГОСТ Р 51747-2001 Система инструментального захода летательных аппаратов на посадку сантиметрового диапазона волн радиомаячная. Основные параметры и методы измерений.
4. Бондарев В.Г., Лопаткин Д.В., Смирнов Д.А. Автоматическая посадка летательного аппарата // Научный

вестник ВГУ. Серия Системный анализ и информационные технологии. 2018. №2. С.44-51.

5. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Советское радио, 1980. 392 с.

6. Пат. 2700908 Российская Федерация, МПК7В64F 1/08 G05D 1/00. Способ определения координат летательного аппарата относительно взлетно-посадочной полосы / Агеев А.М., Бондарев В.Г., Ипполитов С.В., Лопаткин Д.В., Озеров Е.В., Проценко В.В., Смирнов Д.А.; заявитель и патентообладатель авторы. № 2018112532; заявл. 06.04.18; опубл. 23.09.19, Бюл. №27. 8 с.: ил.

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

8. Обработка и распознавание изображений объектов, полученных посредством СТЗ ЛА/ В.Г. Бондарев, Д.А. Смирнов, Н.И. Майгурова, А.В. Николенко, К.Ю. Гусев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 34–42.

Поступила 10.03.2021; принята к публикации 22.06.2021

Информация об авторах

Смирнов Дмитрий Андреевич - инженер-испытатель, Государственный летно-испытательный центр имени В.П. Чкалова, Войсковая часть 15650 (416504, Россия, г. Ахтубинск), e-mail: drone0806@gambler.ru

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

Тепловодский Александр Владимирович - заместитель командира Войсковой части 15650 по ИМ и НИР, Государственный летно-испытательный центр имени В.П. Чкалова, Войсковая часть 15650 (416504, Россия, г. Ахтубинск), e-mail: aodk25@gambler.ru

Николенко Александр Владимирович - младший научный сотрудник 21 отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), e-mail: nikolenko.alexandr.93@yandex.ru

Николенко Ксения Владимировна - студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ks11nikolenko@yandex.ru

SOLUTION OF A NAVIGATION PROBLEM WITH THE USE OF AN AIRCRAFT LANDING CONTROL SYSTEM USING A GLIDE PATH LASER BEACON

D.A. Smirnov¹, V.G. Bondarev², A.V. Teplovodskiy¹, A.V. Nikolenko², K.V. Nikolenko³

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

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

³Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article describes the problem of existing methods for determining coordinates at the stage of landing an aircraft, which have either low accuracy or require complex equipment. Therefore, we present the features of using the system for ensuring the landing of an aircraft with the use of a glide path laser beacon. To land on a laser glide path, it is necessary to equip the aircraft with a vision system with the help of which control automation is possible. In this case, the technical vision system in flight receives navigation information about the movement of the aircraft in real time. We present the implementation of a laser beacon landing by mathematical modeling of the landing process according to the proposed control law. The simulation results show that at the end point (touchdown point of the runway), the flight altitude changes smoothly, which ensures a “soft” landing. The movement is carried out not in a straight line but along a line close to an exponential. In view of the fact that working with laser navigation systems has an effect on the human body, we propose a safe way of using this system and

calculated the reliability of functioning. The proposed system can be applied at airfields of any class and various types of aircraft, on which a photodetector can be installed and there is an automatic flight control system in the landing mode

Key words: aircraft, landing, vision system, glide path laser beacon, system reliability, safety assurance, mathematical modeling, laser radiation, runway

References

1. Belogorodsky S.L. "Automation of aircraft landing control" ("Avtomatizatsiya upravleniya posadkoy samoleta"), Moscow, Transport, 1972, 352 p.
2. Bondarev V.G. "Automatic landing of aircraft", *Aviation and Space Instrument Engineering (Aviakosmicheskoe priborostroenie)*, 2011, no. 3, pp. 21-26.
3. GOST R 51747-2001 "System of instrumental approach of aircraft to landing in the centimeter range of radio beacon waves. Basic parameters and measurement methods"
4. Bondarev V.G., Lopatkin D.V., Smirnov D.A. "Automatic landing of an aircraft", *Scientific Bulletin of VSU (Nauchnyy vestnik VGU)*, 2018, no. 2, pp. 44-51.
5. Yakushenkov Yu.G. "Theory and calculation of optoelectronic devices" ("Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov"), textbook for universities, Moscow, Sovetskoe radio, 1980, 392 p.
6. Ageev A.M., Bondarev V.G., Ippolitov S.V., Lopatkin D.V., Ozerov E.V., Protsenko V.V., Smirnov D.A. "Method for determining the coordinates of the aircraft relative to the runway" ("Sposob opredeleniya koordinat letatel'nogo apparata otositel'no vzletno-posadochnoy polosy"), patent 2700908 Russian Federation, IPC7 B64F 1/08 G05D 1/00, application 06.04.18, publ. 23.09.19, bull. no. 27, 8 p.
7. Smirnov D.A., Molchanov A.S., Bondarev V.G., Maigurova N.I. "Methodology for increasing the range of obtaining a stable image of laser ground beacons on the photographic matrix of the onboard camera of an unmanned aerial vehicle", *I-Methods*, 2020, vol. 12, no. 2, pp. 1-13.
8. Bondarev V.G., Smirnov D.A., Maigurova N.I., Nikolenko A.V., Gusev K.Yu. "Processing and image recognition received by STZ LA", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 34-42.

Submitted 10.03.2021; revised 22.06.2021

Information about the authors

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

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

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

Aleksandr V. Nikolenko, Junior researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54A Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: nikolenko.alexandr.93@yandex.ru

Kseniya V. Nikolenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: ks11nikolenko@yandex.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ ЛИНЗОВЫХ АНТЕНН
НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ****М.П. Беляев¹, Ю.Г. Пастернак^{1,2,3}, В.А. Пендюрин³, Р.Е. Рогозин²****¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия****²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****³АО НПП «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия**

Аннотация: проведен анализ современных конструкций линзовых многолучевых антенн на основе параллельных печатных плат. Использование печатных плат позволяет создавать линзовые антенны различных форм и конструкций, обладающих небольшой массой, технологически простых в производстве. В настоящее время для создания различных радиотехнических устройств широко используются метаматериалы. Одна из типичных сфер применения метаматериалов связана с созданием линз, а также линзовых антенн на их основе. Рассмотрены различные типы метаматериальных линзовых антенн, реализованных на основе параллельных печатных плат: с отрицательным эффективным коэффициентом преломления, сферические, цилиндрические, плоские линзы различных типов. Сделаны выводы о достоинствах и недостатках использования параллельных печатных плат для создания метаматериальных линзовых антенн. Описана возможность использования параллельных печатных плат для создания перспективных конструкций линзовых антенн, реализованных с использованием трансформационной оптики. Приведено описание современных конструкций линзовых антенн высокой направленности на основе многослойных печатных плат. Трансформация фронта волны в таких линзах осуществляется за счет изменения электрических длин линий задержек, соединяющих антенны теневой и облучаемой сторон

Ключевые слова: многолучевые антенны, метаматериалы, метаматериальные линзы, линза Лüneберга, трансформационная оптика, печатные линзы

Введение

Пространственное сканирование в линзовых многолучевых антеннах (МЛА) осуществляется за счет перемещения (или размещения) системы облучателей вдоль фокальной поверхности или по фокальной линии линзы. Поэтому такие антенные системы следует рассматривать как оптические устройства электромагнитных волн, предназначенных для трансформации сферического или цилиндрического фронта волны в плоский. В общем случае, линза представляет собой радиопрозрачную конструкцию с коэффициентом преломления, отличным от единицы.

По сравнению с другими конструкциями МЛА, обзор которых приведен в [1], линзовые МЛА обладают достоинствами: возможность создания осесимметричных систем без затенения с широким сектором сканирования, реализация высоких значений коэффициента направленного действия (КНД), широкополосность. Несмотря на свои достоинства, линзовые ан-

тенны обладают следующими недостатками, ограничивающими их широкое применение в наземных или бортовых радиосистемах: сложность изготовления и высокая стоимость, большая масса, диссипативные потери в линзе.

Линзовые антенны, изготовленные из параллельных печатных плат, обладают небольшой массой, различными формами и конструкциями, технологически просты в производстве. Это позволит применять линзовые МЛА в современных системах радиосвязи различного назначения: в наземных или бортовых радиосистемах, в базовых станциях сотовой связи, в системах радиолокации, радиопеленгации, радиоэлектронной борьбы.

Цель статьи – анализ современных конструкций линзовых МЛА на основе параллельных печатных плат.

Использование метаматериалов

Первые искусственные среды были разработаны еще в середине XX века. В [2] приведено описание эффективных параметров среды в виде сетки из тонких параллельных металличе-

ских проволочек, а в [3] содержится описание расчета восприимчивости различных частиц, например, для эллиптического цилиндра или эллиптического сфероида. Первые микроволновые линзы из искусственного диэлектрика на основе проводящих сфер, внедренных в диэлектрик (полистирол), были разработаны в 1946-1948 годах [4]. Однако большой интерес к созданию и исследованию искусственных сред возник лишь в конце XX века благодаря подтверждению гипотезы советского ученого Виктора Веселаго – создание искусственной среды с отрицательным коэффициентом преломления. Это стало возможным с появлением метаматериалов – современных композитных материалов с электромагнитными свойствами, определяемыми искусственной периодической структурой. В настоящее время метаматериалы широко применяются при создании различных устройств: селективные поверхности и отражающие поверхности, антенны поверхностной волны, сумматоры, фазовращатели, рупорные антенны [5-7] и т.д.

Одна из типичных сфер применения метаматериалов связана с созданием линз, а также линзовых антенн на их основе. Метаматериальные линзы могут иметь разнообразные формы, обладать уникальными характеристиками, иметь меньшую массу и габариты, быть технологически проще в производстве по сравнению с линзами, изготовленными с использованием традиционных способов и средств.

Использование печатных позволяет создавать периодические структуры самых разнообразных видов и форм с высокой точностью. Поэтому данная технология широко используется при создании различных радиотехнических устройств, в том числе и линз различных конструкций. В [8] описана возможность использования линзы с отрицательным эффективным коэффициентом преломления (n_{eff}) для сужения диаграммы направленности (ДН) монополя, расположенного внутри линзы. В [9] описана конструкция метаматериальной линзы, позволяющей повысить коэффициент усиления (КУ) и сузить ДН патч антенны.

Печатные метаматериалы широко используются для создания искусственных сред, в которых n_{eff} является градиентно-изменяющейся величиной. Например, для создания МЛА на основе различных конструкций линзы Лüneберга. Наиболее простой технический способ такой МЛА заключается в создании планарных печатных линз Лüneберга [10, 11]. Такие антенны имеют простую конструкцию и низкую

стоимость производства. Поэтому широкое распространение получили планарные печатные линзы. На рис. 1 показан внешний вид плоской печатной линзы Лüneберга [11].

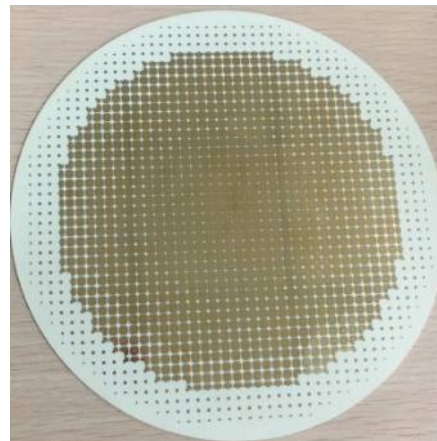


Рис. 1. Плоская печатная линза Лüneберга [11]

Цилиндрические линзы Лüneберга возможно изготавливать с использованием скрученных или параллельных печатных плат. По сравнению с планарными печатными линзами, использование печатных плат позволяет синтезировать цилиндрические линзы больших электрических размеров с использованием небольшого числа печатных плат с возможностью работы в дециметровом диапазоне. В [12] описана возможность создания цилиндрической линзы Лüneберга из набора коаксиальных цилиндров из тонкого стеклотекстолита с вытравленной структурой метаматериала. Недостаток использования скрученных печатных плат в [12] заключается в более сложной конструкции, по сравнению с использованием параллельных печатных плат. Конструкция цилиндрической линзы Лüneберга из параллельных печатных плат показана на рис. 2 [13]. На рис. 3 представлены ДН в азимутальной плоскости и в объеме на 10 ГГц [13].

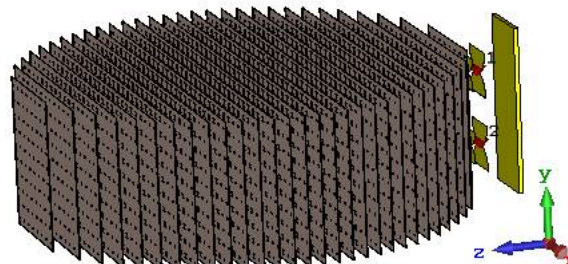


Рис. 2. Цилиндрическая линза Лüneберга из параллельных печатных плат [13]

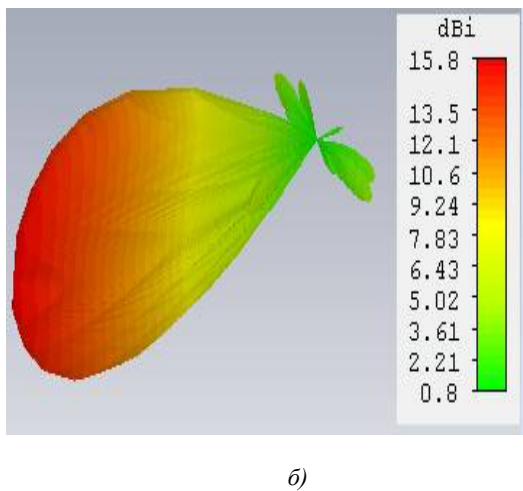
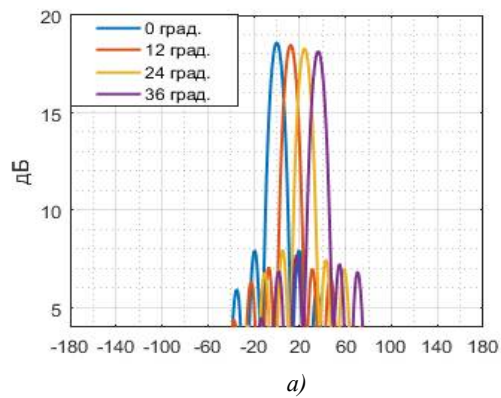


Рис. 3. ДН в азимутальной плоскости (а) и в объеме (б) на 10 ГГц [13]

Наличие дисперсии у используемой периодической структуры метаматериала приводит к перемещению фокусного расстояния с ростом частоты внутрь линзы [13]. Из-за этого линза Люнеберга, показанная на рис. 3, является узкополосной. Подробное описание влияния дисперсии на характеристики цилиндрической линзы Люнеберга содержится в [13].

Один из известных способов реализации цилиндрических или сферических линзовых антенн заключается в создании линз из однородных диэлектриков. При использовании обычных диэлектриков МЛА будут обладать большой массой, что станет препятствием для их использования в бортовых системах связи. Такие антенны целесообразно изготавливать из метаматериалов. В [14] обоснована возможность использования параллельных печатных плат для синтеза цилиндрических линзовых антенн. На рис. 4 показан внешний вид линзы из однородного диэлектрика и метаматериала [14].

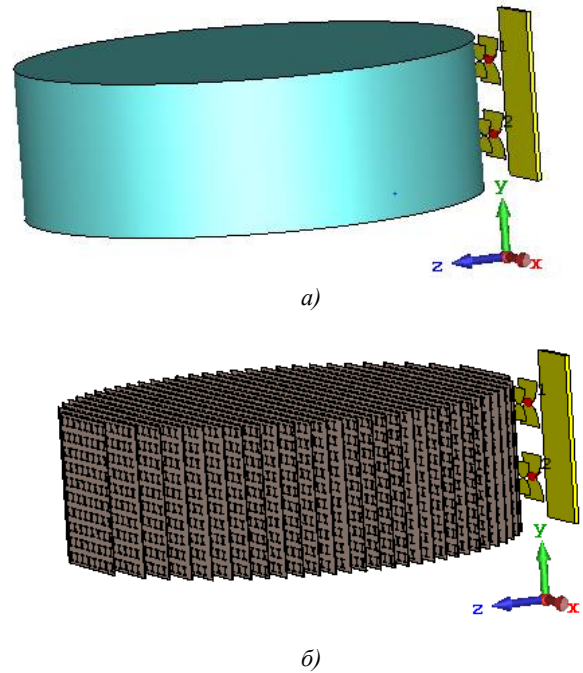


Рис. 4. Линза из однородного диэлектрика (а) и метаматериала (б) [14]

Исследования в [14] показали, что в отличие от линзы Люнеберга наличие дисперсии у метаматериала не приводит к перемещению фокусного расстояния с ростом частоты. Это обеспечивает широкополосность МЛА на основе метаматериальной линзы, показанной на рис. 4б. Обе линзы (рис. 4) обладают схожими направленными свойствами. При этом из-за наличия анизотропии у метаматериальной линзы выше уровень боковых лепестков (УБЛ), чем у линзы из однородного диэлектрика.

Недостаток использования параллельных печатных плат для создания линзовых антенн – наличие анизотропии у ячейки метаматериала. Более подробное описание этого явления содержится в [7]. При синтезе цилиндрических линз наличие анизотропии в направлении перпендикулярном печатным платам не критично, поскольку цилиндрическая линза предназначена для фокусировки цилиндрических волн. В данном случае на направленные характеристики влияет анизотропия, связанная с поворотом облучателя относительно центра линзы, т.е. с азимутальным углом падения электромагнитной волны на периодическую структуру. Сферические линзы фокусируют сферический фронт волны, поэтому их создание с использованием печатных плат осложняется, главным образом из-за анизотропии в направлении перпендикулярном печатным платам. При больших электрических размерах линзы это будет затруднительно. Однако в [15] описана возможность со-

здания сферической линзы Люнеберга для азимутального сканирования диаметром не более двух длин волн. На рис. 5 показан внешний вид сферической линзы и ее ДН на 1,5 ГГц [15].

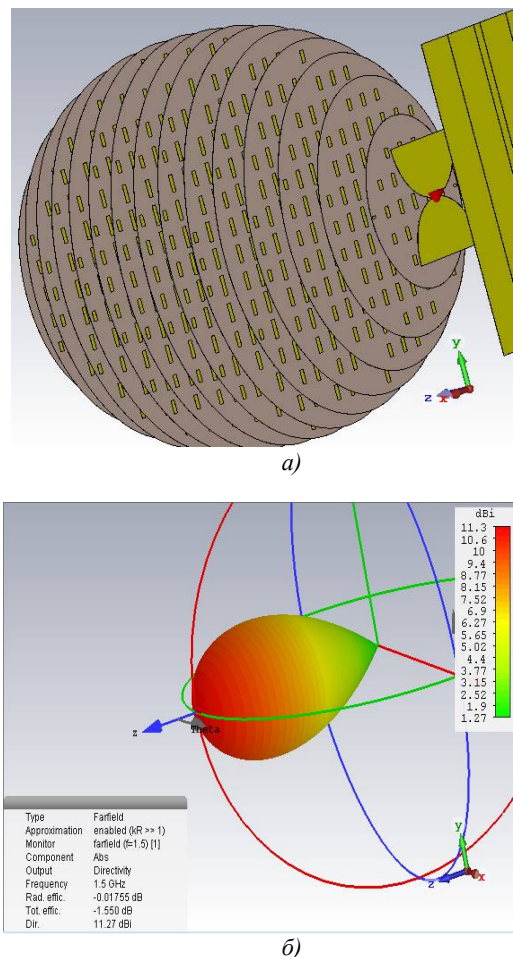


Рис. 5. Сферическая линза Люнеберга из печатных плат (а) и ее ДН (б) на 1,5 ГГц [15]

Возможное техническое решение, позволяющее симметризовать ячейку метаматериала и минимизировать анизотропию – использование металлических штырьков, впаянных перпендикулярно печатным платам. При этом основания штырьков должны быть припаяны к двум соседним печатным платам для придания прочности, т.е. ячейка метаматериала состоит из трех печатных плат. Это приводит к росту потерь и усложнению конструкции. Из-за наличия потерь в метаматериале возможно снижение коэффициента усиления МЛА.

Трансформационная оптика

Использование трансформационной оптики позволяет создавать уникальные устройства с нетрадиционными оптическими свойствами. В 2006 году впервые была продемонстрирована

возможность создания «невидимой» области для электромагнитных волн – описана возможность огибания лучами внутренней части линзы, которая становится «невидимой» для внешнего наблюдателя (рис. 6) [16].

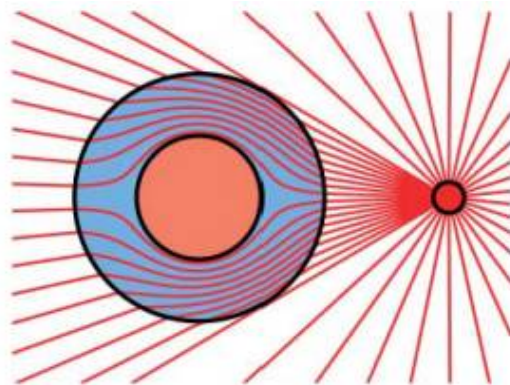


Рис. 6. Огибание лучами внутренней области линзы

Это возможно благодаря инвариантности уравнений Максвелла относительно координатных преобразований $x' = x'(x, y, z)$, $y' = y'(x, y, z)$, $z' = z'(x, y, z)$ применительно к тензорам диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемости исходной системы координат (x, y, z) [16]:

$$\epsilon' = \frac{J\epsilon J^T}{\det(J)}, \quad (1)$$

$$\mu' = \frac{J\mu J^T}{\det(J)}, \quad (2)$$

где ϵ' – тензор диэлектрической проницаемости в системе координат (x', y', z') ; μ' – тензор магнитной проницаемости в системе координат (x', y', z') ; J – матрица Якоби преобразования координат.

Конструкции трансформированных линз Люнеберга, реализованных на основе параллельных печатных плат, описаны в [17, 18]. Линзовая МЛА для сканирования в двух плоскостях описана в [17]. Она представляет собой набор параллельных печатных плат с вытравленной периодической структурой в центральной части, а на краю – перфорированных (рис. 7а). Недосток данной линзы: наличие вынесенного фокуса, небольшой сектор сканирования (не более $\pm 40^\circ$ в обеих плоскостях). На рис. 7б показана трансформированная линза Люнеберга с плоским фокусом для азимутального сканирования [18]. Недостатки данной линзы: сложность конструкции, высокие значения эффективной диэлектрической проницаемости, большие габариты.

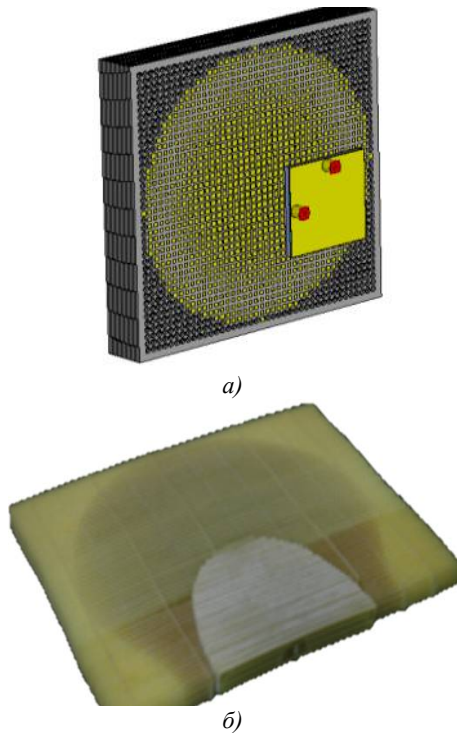


Рис. 7. Огибание лучами внутренней области линзы

Плоские печатные линзы

Печатные линзы – многослойные антенны высокой направленности, которые в настоящее время широко применяются во многих системах связи миллиметрового и микроволнового диапазона: двухточечная связь, спутниковая связь, сотовая связь, военные или гражданские радары. В отличие от других типов линз, в которых трансформация волны облучателя осуществляется за счет изменения геометрии линзы или закона преломления (как у линзы Люнеберга), у печатных линз трансформация фронта осуществляется за счет изменения электрических длин линий задержек, соединяющих антенны (например, патчи) теневой и облучаемой сторон (рис. 8) [19].

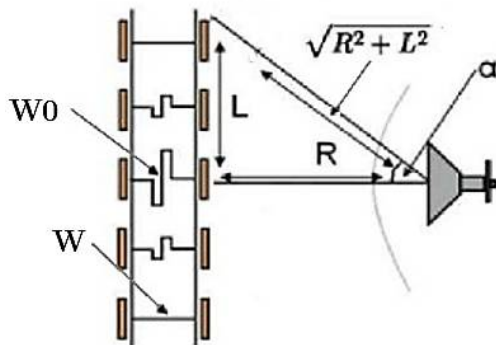


Рис. 8. Коррекция фронта волны облучателя в печатных линзах [19]

Изменение длин линий задержек относительно расположения антенн теневой и облучаемой сторон линзы позволяют создавать конструкции с фокусировкой в нескольких точках [20]. Это позволяет осуществлять сканирование в широком секторе углов в двух плоскостях. Следует отметить, что печатные линзы позволяют сделать развязку по поляризации, т.е. облучатель может иметь линейную поляризацию, тогда как антенная система может осуществлять сканирование при другой поляризации (например, круговой).

По сравнению с другими типами антенн, печатные линзы обладают небольшой массой, возможностью приема волн любых поляризаций. В настоящее время разработаны различные подходы к созданию таких антенных систем, обзор которых приведен в [21].

Выводы

Использование параллельных печатных плат позволяет создавать линзовые антенны, а также МЛА на их основе различных конструкций, созданных с использованием различных физических принципов. Направления перспективных исследований связаны с:

- созданием широкополосных цилиндрических линз из параллельных печатных плат,
- исследованием возможности минимизации анизотропии за счет использования впаянных штырьков. Созданием на основе синтезированного метаматериала сферических антенн;
- изучением влияния количества печатных плат на потери в линзовой МЛА;
- разработкой новых конструкций трехмерно-трансформированных линз;
- синтезом и анализом широкоугольных печатных линз.

Литература

1. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи / А.В. Шишлов, Б.А. Левитан, С.А. Топчиев, В.Р. Анпилов, В.В. Денисенко // Журнал радиоэлектроники. 2018. №7. С. 1-30.
2. Brown J. Artificial dielectrics having refractive indices less than unity // Proceedings of the IEE - Part III: Radio and Communication Engineering. 1953. Vol. 100. № 67. Pp. 319-320.
3. Щелкунов С., Фриис Г. Антенны. М.: Советское радио, 1955. 604 с.
4. Kock W.E. Metallic delay lenses // The Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. №1. Pp. 58-82.
5. Munk B.A. Frequency selective surfaces: Theory and design. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 410 p.

6. Caloz Ch., Itoh T. Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications: the engineering approach. Wiley, 2006. 352 p.
7. Werner D.H. Broadband Metamaterials in Electromagnetics Technology and Applications. Pan Stanford Publishing, 2007. 382 p.
8. Experimental Study of $\lambda/4$ Monopole Antennas in a Left Handed Meta-Material / Q. Sui, C. Li, L.L. Li, F. Li // Progress In Electromagnetics Research. 2005. Vol. 51. Pp. 281-293.
9. A high-gain lens antenna based on novel left-handed metamaterial / J. Yang, F. Xu, W. Chen, L. Cao // Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). 2017.
10. Deepthi K.V.B.L., Sankar K.J. An Investigation of the Substrate-Integrated Luneburg Lens Antenna with gradient Index and Meta-material Structures // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. №8. Pp. 5762-5766.
11. Planar Luneburg Lens Based on the High Impedance Surface for Effective Ku-Band Wave Focusing / G. Cheng, Y. Wu, J.X. Yin, N. Zhao, T. Qiang, X. Lv // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 16942-16947.
12. Modified Luneburg Lens Based on Metamaterials / H. Chen, Q. Cheng, A. Huang, J. Dai, H. Lu, J. Zhao, H. Ma, W. Jiang, T. Cu // International Journal of Antennas and Propagation. 2015. Vol. 2015. 6 p.
13. Влияние дисперсии метаматериалов на характеристики линзы Лüneберга / О.Ю. Макаров, Ю.Г. Пастернак, Р.Е. Рогозин, Е.А. Рогозин, С.М. Фёдоров // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 6 (12). С. 42-48.
14. Синтез и анализ одной цилиндрической линзы, построенной на основе параллельных печатных плат с электрически малыми рассеивателями / Ю.Г. Пастернак, Е.А. Рогозин, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. №4. С. 83-90.
15. Сферическая линза Лüneберга на основе печатных плат с электрически малыми рассеивателями / К.А. Быков, Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. №1. С. 78-83.
16. Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R. Controlling electromagnetic fields // Science. 2006. Vol. 312. №5781. Pp. 1780-1782.
17. Su Y., Chen Z.N. A Flat Dual-Polarized Transformation-Optics Beamsweeping Luneburg Lens Antenna Using PCB-Stacked Gradient Index Metamaterials // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. №10. Pp.5088-5097.
18. Kundtz N., Smith D.R. Extreme-angle broadband metamaterial lens // Nature Materials. 2010. Vol. 9. Pp. 129-132.
19. Padilla P., Muñoz-Acevedo A., Sierra-Castañer M. Passive planar transmit-array microstrip lens for microwave purpose // Microwave and Optical Technology Letters. 2010. Vol. 52. №4. Pp. 940-947.
20. McGrath D. Planar three-dimensional constrained lenses // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34. №1. Pp. 46-50.
21. Hum S.V., Perruisseau-Carrier J. Reconfigurable Reflectarrays and Array Lenses for Dynamic Antenna Beam Control: A Review // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2014. Vol. 62. №1. Pp. 183-198.

Поступила 17.02.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

Беляев Максим Павлович – канд. техн. наук, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: belyaev_mp@mail.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а); АО НПП «Автоматизированные системы связи» (Россия, 394062, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, 108, офис 415), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Пендюрин Владимир Андреевич – генеральный директор, АО НПП «Автоматизированные системы связи» (Россия, 394062, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, 108, офис 415), e-mail: pva777777@yandex.ru

Рогозин Руслан Евгеньевич – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

INVESTIGATION OF MULTIBEAM LENS ANTENNAS BASED ON PARALLEL PRINTED CIRCUIT BOARDS

M.P. Belyaev¹, Yu.G. Pasternak^{1,2,3}, V.A. Pendyurin³, R.E. Rogozin²

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

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³JSC NPP «Automated communication systems», Voronezh, Russia

Abstract: here we give an analysis of modern designs of lens multipath antennas based on parallel printed circuit boards. The use of printed circuit boards allows you to create lens antennas of various shapes and structures with a small mass, technologically easy to manufacture. Currently, metamaterials are widely used to create various radio devices. One of the typical applications of metamaterials relates to the creation of lenses, as well as lens antennas based on them. The article considers various types of metamaterial lens antennas implemented on the basis of parallel printed circuit boards: with a negative effective

tive refractive index, spherical, cylindrical, flat lenses of various types. We made conclusions about the advantages and disadvantages of using parallel printed circuit boards to create metamaterial lens antennas. We described the possibility of using parallel printed circuit boards to create perspective designs of lens antennas implemented using transformational optics. We give a description of modern designs of high-directional lens antennas based on multilayer printed circuit boards. We carried out the transformation of the wave front in such lenses by changing the electrical lengths of the delay lines connecting the antennas of the shadow and irradiated side

Key words: multibeam antennas, metamaterials, metamaterial lenses, Luneberg lens, transformational optics, printed lenses

References

1. Shishlov A.V., Levitan B.A., Topchiev S.A., Anpilogov V.R., Denisenko V.V. "Multi-beam antennas for radar and communications systems", *Journal of Electronics (Zhurnal radioelektroniki)*, 2018, no. 7, pp. 1-30.
2. Brown J. "Artificial dielectrics having refractive indices less than unity", *Proceedings of the IEE - Part III: Radio and Communication Engineering*, 1953, vol. 100, no. 67, pp. 319-320.
3. Shchelkunov S., Friis G. "Antennas" ("Antenny"), Moscow, Sovetskoe radio, 1955, 604 p.
4. Kock W.E. "Metallic delay lenses", *The Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, no. 1, pp. 58-82.
5. Munk B.A. "Frequency selective surfaces: Theory and design", New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000, 410 p.
6. Caloz Ch., Itoh T. "Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications: the engineering approach", Wiley, 2006, 352 p.
7. Werner D.H. "Broadband metamaterials in electromagnetics technology and applications", Pan Stanford Publishing, 2007, 382 p.
8. Sui Q., Li C., Li L.L., Li F. "Experimental study of $\lambda/4$ monopole antennas in a left handed meta-material", *Progress In Electromagnetics Research*, 2005, vol. 51, pp. 281-293.
9. Yang J., Xu F., Chen W., Cao L. "A high-gain lens antenna based on novel left-handed metamaterial", *Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, 2017.
10. Deepthi K.V.B.L., Sankar K.J. "An Investigation of the substrate-integrated Luneburg lens antenna with gradient index and meta-material structures", *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, vol. 11, no. 8, pp. 5762-5766.
11. Cheng G., Wu Y., Yin J.X., Zhao N., Qiang T., Lv X. "Planar Luneburg lens based on the high impedance surface for effective Ku-band wave focusing", *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 16942-16947.
12. Chen H., Cheng Q., Huang A., Dai J., Lu H., Zhao J., Ma H., Jiang W., Cu T. "Modified Luneburg lens based on metamaterials", *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, vol. 2015, p. 6
13. Makarov O.Y., Pasternak Yu.G., Rogozin R.E., Rogozin E.A., Fedorov S.M. "Effect of metamaterials dispersion on Luneburg lens characteristics", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2020, vol. 84, no. 6 (12), pp. 42-48.
14. Pasternak Yu.G., Rogozin E.A., Rogozin R.E., Fedorov S.M. "Synthesis and analysis of one cylindrical lens based on parallel printed circuit boards with electrically small diffusers", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 83-90.
15. Bykov K.A., Korotkov L.N., Pasternak Yu.G., Rogozin R.E., Fedorov S.M. "Spherical Luneburg lens on the basis of printed boards with electrically small diffusers", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 78-83.
16. Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R. "Controlling electromagnetic fields", *Science*, 2006, vol. 312, no. 5781, pp. 1780-1782.
17. Su Y., Chen Z.N. "A flat dual-polarized transformation-optics beamscanning Luneburg lens antenna using PCB-stacked gradient index metamaterials", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 10, pp. 5088-5097.
18. Kundtz N., Smith D.R. "Extreme-angle broadband metamaterial lens", *Nature Materials*, 2010, vol. 9, pp. 129-132.
19. Padilla P., Muñoz-Acevedo A., Sierra-Castañer M. "Passive planar transmit-array microstrip lens for microwave purpose", *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, vol. 52, no. 4, pp. 940-947.
20. McGrath D. "Planar three-dimensional constrained lenses", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34, no. 1, pp. 46-50.
21. Hum S.V., Perruisseau-Carrier J. "Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: a review", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, vol. 62, no. 1, pp. 183-198.

Submitted 17.02.2021; revised 21.06.2021

Information about the authors

Maksim P. Belyaev, Cand. Sc. (Technical), Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: belyaev_mp@mail.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Leading Engineer of JSC "IRKOS" (21, Zvezdnyy avenue, Moscow 129626, Russia); Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru.

Vladimir A. Pandyurin, General Director, JSC RPE "Automated Communication Systems" (of. 415, 108 Peshe-Streletskaaya str., Voronezh 394062, Russia), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

Ruslan E. Rogozin, Seeker, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia a), e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

МОДЕЛЬ НЕДВОИЧНОГО LDPC-ДЕКОДЕРА НИЗКОЙ СЛОЖНОСТИ НА ОСНОВЕ РАСШИРЕННОГО АЛГОРИТМА MIN-SUM

О.Ю. Макаров, Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, А.С. Демихова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: информация, представленная в данной статье, направлена на уменьшение вычислительной сложности при моделировании помехоустойчивого декодера, работающего по алгоритму MIN-SUM. Основное внимание в представленной работе уделяется модификациям проверочной матрицы, в которых улучшена производительность декодирования с пониженной вычислительной сложностью. Слабым местом общепринятой модели является повышенное требование к объему памяти и вычислительная сложность. Модификации в алгоритме могут улучшить его показатели при разработке аппаратной архитектуры NB-LDPC-декодера. Приведен анализ производительности модифицированных матриц контроля по четности с точки зрения коэффициента битовых ошибок (BER) для длины кода стандарта IEEE 802.11n и 504. Описан вычислительный анализ модифицированных матриц контроля по четности. Предложен анализ эффективности нижней диагональной матрицы контроля четности (НДМ) и на основе двойной диагональной матрицы контроля четности (ДДМ) анализируются BER графиков и также оцениваются вычислительные сложности. Количество вычислений значительно меньше в НДМ по сравнению с другими матрицами. НДМ подходит для умеренной производительности декодирования с меньшей сложностью вычислений и на основе ДДМ структур. Предложенные модификации применимы для улучшения производительности декодирования с компромиссом по вычислительной сложности

Ключевые слова: матрица контроля четности, алгоритм декодирования min-sum, двоичная диагональная матрица контроля четности, нижняя диагональная матрица контроля четности

Введение

Недвоичный LDPC-код относится к классу кодов, которые работают на более высоких порядках поля Галуа. Производительность декодирования недвоичных (NB) LDPC лучше, чем двоичных LDPC для умеренных длин кода. Увеличение сложности производимых вычислений с увеличением порядка поля является серьезной проблемой при аппаратной реализации NB-LDPC-декодера. Расширение обычного алгоритма Min-Sum, известного как расширенный алгоритм Min-Sum (EMS), с пониженной вычислительной сложностью используется при исследовании в данной работе. Существует компромисс между увеличением сложности вычислений и производительностью декодирования.

Благодаря высокой корректирующей способности, коды LDPC используются в таких стандартах, как DVB-S2, WiMAX, WLAN, устройства хранения данных и так далее. Недвоичные LDPC (NB-LDPC) рассматриваются как расширение двоичных кодов [1, 3]. NB-LDPC-коды имеют ряд преимуществ в производительности над двоичными кодами. На ос-

нове упрощенного алгоритма min-sum возможно построить архитектуру декодера, в которой применяемый метод проектирования увеличивает параллелизм и пропускную способность в три или четыре раза. Сложность декодирования уменьшается при использовании расширенного алгоритма Min-Sum (EMS). Он также работает с логарифмическим отношением правдоподобия (LLR). LLR является предпочтительным, так как он требует при декодировании только операции суммирования. Это также уменьшает вычислительную нагрузку на работу проверочного узла. Данная работа направлена на уменьшение аппаратной сложности декодера, а также уменьшение требований к объему требуемой для декодирования памяти посредством модификации матрицы контроля четности. Скорость возникновения дефектных битов информации при передаче сигнала в канале связи (Bit-Error-Rate, BER) для наилучших показателей матрицы контроля четности NB используется в стандарте IEEE 802.11n с длиной кода 648 и в данной работе.

Представление недвоичных LDPC-кодов

LDPC-коды можно представить матрицей проверки четности. Количество ненулевых элементов в каждой строке матрицы контроля

четности w_r и w_c – равно числу ненулевых элементов в каждом столбце. Чтобы матрица была низкой плотности, должно выполняться условие $w_c \ll n$ и $w_r \ll m$. (m, n) – количество строк и столбцов, присутствующих в матрице контроля четности. Рис. 1 показывает матричное представление NB-LDPC, вычислительная нагрузка в проверочном узле в основном зависит от количества ненулевых элементов, присутствующих в матрице контроля четности (МКЧ) [5].

$$H = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 3 & 0 & 0 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 3 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Пример матрицы контроля четности

Алгоритм Min-Sum с соответствующими изменениями дает незначительное снижение производительности, но требует только операции суммирования и сравнения, что уменьшает его вычислительную сложность [4].

Работа модифицированного алгоритма Min-Sum:

1) Инициализация. Все сообщения, переданные от переменного узла к проверочному узлу, инициализируются $L_n(a)$ - логарифмическим отношением правдоподобия относительно символа "a".

$$L_n(a) = \ln \left(\Pr \left(c_n = s_n \mid \frac{\text{channel}}{\Pr(c_n = a \mid \text{channel})} \right) \right), \quad (1)$$

$$Q_{mn}(a) = L_n(a), \quad (2)$$

где s_n обозначает наиболее вероятный символ "a".

2) Обновление переменного узла. Все сообщения из проверочных узлов обновляются, используя:

$$R(a) = \min_{(an')_{n \in N(m)\{n\}} \in A_{mn}(a)} \left(\sum_{n \in N(m)\{n\}} Q_{mn}(a) \right). \quad (3)$$

$$A_{mn}(a) := \left\{ a_{n'} \mid h_{mn} a + \sum_{n \in N(m)\{n\}} h_{mn} a_{n'} \right\}, \quad (4)$$

где $A_{m,n}(a)$ это множество векторов, которые состоят из символов поля Галуа. Каждый вектор состоит из $N(m)-1$ символов поля Галуа, что удовлетворяет проверочному уравнению.

3) Все сообщения из переменных узлов обновляются, используя:

$$Q'_{mn}(a) = L_n(a) + \sum_{m' \in M(n)\{m\}} R_{mn'}(a), \quad (5)$$

$$Q'_{mn} = \min_{a \in GF(q)} Q'_{mn}(a), \quad (6)$$

$$Q_{mn}(a) = Q'_{mn}(a) - Q'_{mn}. \quad (7)$$

$M(n)$ обозначает набор ближайших проверочных узлов, соединенных с переменным узлом n .

4) Предварительное декодирование. Оценка переменного узла осуществляется с использованием уравнения

$$Q_n(a) = L_n(a) + \sum_{n \in M(n)} R_{mn}(a), \quad (8)$$

$$\bar{c}_n = \arg \min(Q_n(a)), \quad (9)$$

$$c = [\bar{c}_0 \bar{c}_1 \dots \bar{c}_{N-1}]. \quad (10)$$

Если истинное кодовое слово не получено до момента достижения максимального значения итераций декодирования, то процесс останавливается [1, 2].

Измененная матрица проверки на четность

Эффективность LDPC-декодеров определяется количеством ненулевых элементов, присутствующих в матрице контроля четности. Их вычислительная сложность возрастает с увеличением числа ненулевых элементов. Увеличение разреженности матрицы проверки четности, в свою очередь, уменьшает вычислительную сложность. МКЧ имеет следующие структурные свойства:

- каждая строка имеет вес w_r ;
- каждый столбец имеет вес w_c ;
- две строки (или два столбца) не имеют более чем одного положения, где они оба имеют ненулевые элементы.

Изменения

С помощью генерируемой случайным образом матрицы проверки на четность предлагаем две модификации, позволяющие снизить вычислительную сложность, сохраняя структурные свойства МКЧ, а именно:

- введем нижнюю диагональную матрицу контроля четности;
- введем двойную диагональную матрицу контроля четности.

Нижняя диагональная матрица контроля четности (НДМ)

Здесь основное внимание уделяется диагональным элементам матрицы. В первом виде предлагаем модифицированную структуру МКЧ, где изменены диагональные элементы нижней части матрицы МКЧ. Нижняя матрица контроля четности по диагонали в размере (12, 24) показана на рис. 2.

ности (ДДМ) и нижней диагональной матрицы контроля четности (НДМ). Из данных в таблице можно сделать вывод о том, что число операций сложения и операций сравнения в блоке проверочных узлов (C_{Nu}) и блоке переменных узлов (V_{Nu}) для НДМ является наименьшим, так как количество ненулевых элементов в ней меньше по сравнению со стандартной МКЧ и ДДМ.

Таблица 1

Вычислительная сложность min-sum декодирования с измененными матрицами контроля четности

Расчеты	Стандартная МКЧ	НДМ	ДДМ
Количество операций сложения в C _{Nu}	$m(qn_r - 1)$	$m(qn'_r - 1)$	$m(qn''_r - 1)$
Количество операций сравнения в V _{Nu}	$n(qn_c - 1)$	$n(qn'_c - 1)$	$n(qn''_c - 1)$

Где q – порядок поля Галуа;
 m – число строк в МКЧ;
 n – число столбцов в МКЧ;
 n_r – вес строки в МКЧ;
 n_c – вес столбца в МКЧ;
 n'_r – вес строки в НДМ;
 n'_c – вес столбца в НДМ;
 n''_r – вес строки в ДДМ;
 n''_c – вес столбца в ДДМ

Табл. 2 показывает, какое требуется количество операций сложения и операций сравнения в C_{Nu} и V_{Nu} для стандартной МКЧ, ДДМ и НДМ для площади матрицы 12x24. По сравнению со стандартным МКЧ число операций сложения и операций сравнения меньше для нижней диагональной матрицы контроля четности.

Таблица 2

Количество вычислений в измененных матрицах контроля четности

Расчеты	Стандартная МКЧ		НДМ		ДДМ	
	сложение	сравнение	сложение	сравнение	сложение	сравнение
B _{C_{Nu}}	276	276	180	180	304	304
B _{V_{Nu}}	264	264	168	168	292	292

Для двойной диагональной матрицы контроля четности вычислительная сложность

выше по сравнению со стандартной МКЧ. Но производительность ДДМ лучше, чем для других матриц.

Анализ полученных результатов и выводы

В данной работе предложены две модификации в структуре МКЧ, в которых улучшена производительность декодирования с пониженной вычислительной сложностью. Предложен анализ эффективности нижней диагональной матрицы контроля четности (НДМ) и на основе двойной диагональной матрицы контроля четности (ДДМ). Проведен анализ BER с построением графиков и также оцениваются вычислительные сложности. Количество вычислений гораздо меньше в НДМ по сравнению с другими матрицами. Сделан вывод, что на основе НДМ структуры МКЧ подходят для умеренной производительности декодирования с меньшей сложностью вычислений и на основе ДДМ структур МКЧ применимы для повышения производительности декодирования с компромиссом по вычислительной сложности.

Литература

1. Mackay D.J., Neal R. Near Shannon - Limit performance of low density parity-check codes// Electronics Letters. 1996. Vol. 32. pp. 1645-1646.
2. Методика проектирования синтезатора частот прямого цифрового синтеза на базе ПЛИС / А.А. Пирогов, Е.А. Бочаров, Э.В. Сёмка, О.Ю. Макаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 108-116
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.
4. Реализация на ПЛИС схемы квантования сообщения для NB-LDPC-декодера / Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, С.Ю. Белецкая // Радиотехника. 2017. № 6. С. 184-189.
5. Преимущества и недостатки LDPC-кодов на примере алгоритма инвертирования бита и распространения доверия / А.С. Костюков, А.В. Башкиров, Л.Н. Никитин, А.А. Пирогов, Н.В. Астахов // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет, 2019. Т. 2. С. 120-124.

Поступила 02.04.2021; принята к публикации 17.06.2021

Информация об авторах

Макаров Олег Юрьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: moy230@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2106-2027>

Астахов Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-8574>

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

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

Демикова Алеся Сергеевна – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

LOW-COMPLEXITY NON-BINARY LDPC DECODER MODEL BASED ON THE EXTENDED MIN-SUM ALGORITHM

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

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the information presented in this article is aimed at reducing the computational complexity of modeling a noise-tolerant decoder using the MIN-SUM algorithm. The main attention is paid to the modifications of the test matrix, in which the decoding performance is improved with reduced computational complexity. The weak point of the generally accepted model is the increased memory requirement and computational complexity. Modifications to the algorithm can improve its performance when developing the hardware architecture of a NB-LDPC decoder. In this paper, we analyze the performance of modified parity control matrices in terms of the bit error rate (BER) for the code length of the IEEE 802.11 n and 504 standards. We describe a computational analysis of modified parity-based control matrices. We give an analysis of the effectiveness of the lower diagonal parity matrix (NDM), and based on the double diagonal parity matrix (DDM), we analyzed the BER of graphs and estimated computational complexity. The number of calculations is significantly less in the NDM compared to other matrices. NDM is suitable for moderate decoding performance with less computational complexity and based on DDM structures. The proposed modifications are applicable to improve the performance of de-coding with a compromise on computational complexity

Key words: parity check matrix, min-sum decoding algorithm, binary diagonal parity check matrix, lower diagonal parity check matrix

References

1. Mackay D.J., Neal R. "Near Shannon-limit performance of low density parity-check codes", 1996, vol. 32, pp. 1645-1646.
2. Pirogov A.A., Bocharov E.A., Semka E.V., Makarov O.Yu. "FPGA-based frequency synthesis synthesizer design technique", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 6, pp. 108-116.
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.
4. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V., Beletskaya S.Yu. "Implementation on FPGA of a message quantization scheme for NB-LDPC decoder", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2017, no. 6, pp. 184-189.
5. Kostyukov A.S., Bashkirov A.V., Nikitin L.N., Pirogov A.A., Astakhov N.V. "Advantages and disadvantages of LDPC codes by the example of the bit inversion algorithm and the propagation of trust", *Proc. of Int. Symposium: Reliability and Quality (Tr. mezhdunar. simpoziuma Nadezhnost' I kachestvo)*, Penza State University, 2019, vol. 2, pp. 120-124.

Submitted 02.04.2021; revised 17.06.2021

Information about the authors

Oleg Yu. Makarov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: moy230@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2106-2027>

Nikolay V. Astakhov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kokakoller@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-8574>

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Alesya S. Demikhova, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

СИНТЕЗ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С СЕКТОРНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

А.В. Останков¹, А.С. Нечаев¹, С.Ю. Дашян²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Университет Лилля, г. Вильнёв-д'Аск, Франция

Аннотация: при синтезе фазированной антенной решетки с секторной диаграммой направленности методами, основанными на разложении диаграммы в обобщенный ряд Фурье, затруднительно обеспечить заданные показатели качества направленности. Причинами ухудшения показателей секторной диаграммы являются конечное число используемых при синтезе базисных функций и ограниченность в пространстве амплитудно-фазового распределения на апертуре решетки. Цель работы – показать на примере линейной эквидистантной антенной решетки, что применение при синтезе оптимизированного шаблона оригинальной формы позволяет достичь улучшенных показателей секторной диаграммы направленности. Для обеспечения предсказаний диаграммы направленности предложен шаблон, один параметр которого определяет ширину, а второй – степень сглаженности вершины диаграммы. Малое число параметров шаблона дает возможность при его оптимизации отказаться от методов эволюционного поиска и упростить процедуру синтеза. На конкретных примерах показано, что применение оптимизированного шаблона позволяет достичь улучшенных показателей секторной диаграммы направленности. Так, удается существенно снизить амплитуду переколебаний вершины диаграммы направленности при максимально возможной крутизне её скатов, а также добиться точного соответствия ширины диаграммы исходно заданному сектору. Применение представленной методики синтеза позволяет проектировать линейные фазированные антенные решетки для формирования секторных диаграмм направленности с улучшенными показателями качества

Ключевые слова: фазированная антенная решётка, секторная диаграмма направленности, синтез, ряд Котельникова, шаблон, оптимизация

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и НЦНИ в рамках научного проекта № 20-51-15001

Введение

Антенны с секторными диаграммами направленности (ДН) получили широкое распространение в радиотехнических системах специального и гражданского назначения. В зависимости от типа радиотехнической системы, в которой используется подобная антенна, требования к показателям секторной ДН различны. Однако повсеместно наблюдается тенденция к ужесточению требований к степени неравномерности излучения в секторе обзора, уровню бокового излучения, крутизне скатов ДН.

Требуемые показатели секторной ДН складываются на этапе синтеза антенны. Для синтеза фазированной антенной решётки (ФАР) со специальной диаграммой направленности к настоящему времени разработано большое число методов и их модификаций. К ставшим уже классическими, можно отнести метод интеграла Фурье [1], метод парциальных диаграмм [2], метод разложения ДН в ряд Котельникова [3]. Однако при синтезе секторной ДН из-за огра-

ниченности числа базисных функций, используемых при разложении в ряд диаграммы направленности, и усечения амплитудно-фазового распределения (АФР) токов (полей) в пространстве проявляется эффект Гиббса, существенно ухудшающий показатели ДН. Достижение заданных показателей может потребовать либо применения более сложного метода синтеза, либо внесения предсказаний в исходный прямоугольный шаблон ДН, используемый при синтезе для расчета АФР [4,5]. Параметры, определяющие форму шаблона, должны быть подобраны так, чтобы гарантировать заданные показатели секторной ДН.

Цель работы – на примере линейной эквидистантной ФАР показать, что применение оптимизированного шаблона оригинальной формы позволяет достичь улучшенных показателей секторной ДН.

Постановка задачи

Пусть в угловом секторе $\Delta\Theta$, симметричном относительно нормали к раскрытию ФАР, требуется обеспечить секторную ДН (рис. 1,а).

На рис. 1,б в линейном масштабе на фоне идеальной нормированной секторной ДН, показанной штрихом, сплошной приведена реалистичная ДН по напряженности поля, формируемая линейной ФАР с конечным числом элементов. На рис. 1,в те же ДН показаны в логарифмическом масштабе.

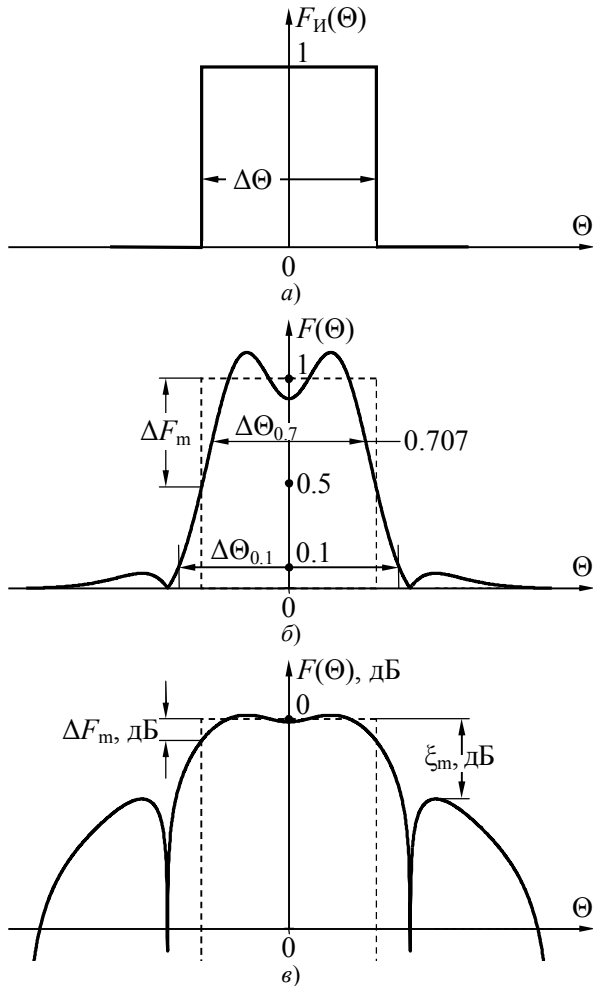


Рис. 1

Для оценки качества реалистичной (синтезированной, фактической) нормированной секторной ДН $F(\Theta)$ линейной ФАР предлагается использовать следующие показатели:

а) максимальное отклонение ДН от единичного уровня в пределах сектора $\Delta\Theta$:

$$\Delta F_m = 20 \cdot \lg[\max_{\Theta \in [-\Delta\Theta/2; \Delta\Theta/2]} |F(\Theta) - 1|]; \quad (1)$$

б) амплитуду переколебаний вершины ДН:

$$F_m = 20 \cdot \lg[\max F(\Theta)]; \quad (2)$$

в) коэффициент прямоугольности:

$$K_{\Pi} = \frac{\Delta\Theta_{0.7}}{\Delta\Theta_{0.1}}, \quad (3)$$

где $\Delta\Theta_{0.7}$, $\Delta\Theta_{0.1}$ – ширина ДН по уровню «минус» 3 дБ и «минус» 20 дБ соответственно.

з) максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ) ξ_m в дБ (рис. 1,в).

Как уже указывалось, при синтезе секторной ДН в силу ограниченности в пространстве АФР на апертуре конечной ФАР фактическая ДН неравномерна в пределах сектора $\Delta\Theta$, обладает наклонными скатами, выбросами вблизи границ сектора, боковыми лепестками за пределами сектора. Кроме того, фактическая ширина ДН, как правило, всегда несколько меньше требуемого сектора $\Delta\Theta$ (рис. 1,б). Заметим, что крутизна наклона скатов, характеризуемая коэффициентом прямоугольности ДН, напрямую связана с величиной выбросов (амплитудой переколебаний вершины ДН) вблизи границ сектора. Чем меньше амплитуда переколебаний, тем меньше коэффициент прямоугольности. Поэтому задача обеспечения максимума прямоугольности ДН и минимума амплитуды переколебаний вершины осложнена их взаимной противоречивостью.

Для улучшения показателей качества реалистичной ДН (за исключением, быть может, коэффициента прямоугольности) предлагается использовать при синтезе шаблон ДН, несколько отличный от прямоугольного шаблона. Одно из предсказаний, вносимое в исходный прямоугольный шаблон ДН, применяемый при расчете АФР, заключается в расширении шаблона в δ_1 раз (рис. 2), второе – в замене плоской вершины сектора сглаженной, описываемой квадратичной функцией с параметром, обратно пропорциональным δ_2 :

$$F_{\text{ш}}(\Theta) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\delta_2} \cdot \left(\frac{2\Theta}{\Delta\Theta}\right)^2 & \text{if } |\Theta| \leq \delta_1 \cdot \frac{\Delta\Theta}{2} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

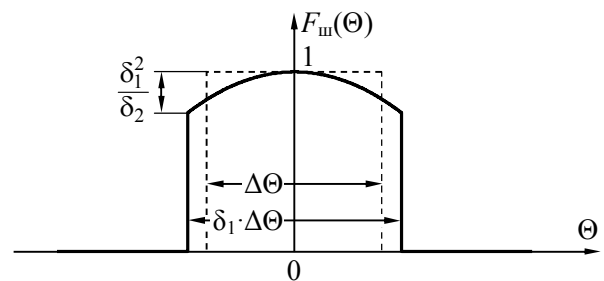


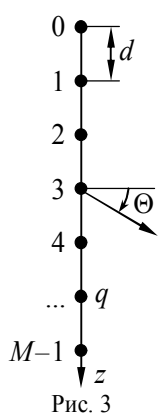
Рис. 2

Предлагаемый шаблон отличается от шаблона, описанного в [4], вдвое меньшим числом параметров, что позволяет при поиске их оптимальных значений отказаться от применения

эволюционных алгоритмов поиска [4-7] и использовать простой последовательный поиск.

Следует отыскать параметры шаблона δ_1 и δ_2 так, чтобы при максимально возможном коэффициенте прямоугольности синтезированной ДН её ширина точно соответствовала заданной ширине сектора $\Delta\Theta$, а амплитуда переколебаний вершины не превышала заданную при синтезе величину.

Методы решения задачи



Модельная геометрия линейной эквидистантной ФАР, реализующей секторную ДН по шаблону (4) в вертикальной плоскости (в плоскости угла Θ , откладываемого по часовой стрелке от нормали к апертуре ФАР), показана на рис. 3.

ФАР содержит чётное число M одинаковых изотропно излучающих элементов с фазовыми центрами, расположенными на прямой Oz . Расстояние между

ближайшими элементами ФАР равно половине длины волны в свободном пространстве: $d = \lambda/2$. В рамках модели предполагается, что связь по полю между элементами ФАР полностью отсутствует. Заметим, что изотропная ДН элементов не является обязательным условием, однако для упрощения модели ФАР предполагается.

В рамках подобной модели ФАР комплексная ДН по напряжённости поля определяется известным соотношением [8], в котором \dot{A}_q – комплексная амплитуда тока в q -м элементе:

$$\dot{F}(\Theta) = \sum_{q=0}^{M-1} \dot{A}_q \cdot \exp\left[j2\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \sin\Theta \cdot \left(q - \frac{M}{2}\right)\right]. \quad (5)$$

Расчет комплексных амплитуд токов в элементах ФАР выполняется согласно известной методике синтеза ФАР с ДН специальной формы, основанной на представлении ДН конечным рядом в базисе Котельникова [9]:

$$\dot{A}_q = \sum_{p=-M/2}^{M/2} B_p \cdot \exp[j\pi \cdot p \cdot (M-1-2q)/M], \quad (6)$$

где B_p – веса базисных функций Котельникова, рассчитываемые по шаблону секторной ДН $F_{ш}(\Theta)$ согласно выражению:

$$B_p = \frac{M}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} F_{ш}(u) \cdot \text{sinc}(M \cdot u - \pi \cdot p), \quad (7)$$

где $u = \pi \cdot (d/\lambda) \cdot \sin\Theta$.

Поисковая задача параметров шаблона относится к классу оптимизационных задач, поэтому требует формирования и последующего применения функции цели. В качестве функции цели предлагается использовать коэффициент прямоугольности синтезированной ДН при условии ограничения величин амплитуды переколебаний вершины ДН и разности между фактической и заданной шириной ДН. Последнее обеспечивается наложением жесткого ограничения на максимальное отклонение ДН от идеальной ДН в пределах заданного сектора, которое может отличаться от 3 дБ на некоторую малую величину (например, 0.1 дБ). Таким образом, в качестве критерия отыскания оптимального шаблона, характеризуемого параметрами δ_1, δ_2 , взято следующее условие:

$$K_n(\delta_1, \delta_2) = \max \begin{cases} |\Delta F_m(\delta_1, \delta_2) - 3 \text{ дБ}| \leq 0.1 \text{ дБ}, \\ F_m(\delta_1, \delta_2) \leq F_{m \text{ тр}}. \end{cases} \quad (8)$$

где $F_{m \text{ тр}}$ – требуемое значение показателя F_m .

Результаты и их обсуждение

Ниже в таблице представлены результаты синтеза секторной ДН с шириной сектора $\Delta\Theta = 60^\circ$, формируемой линейной ФАР с числом элементов, равным 8-ми ($M = 8$). При синтезе использовался предварительно оптимизированный в соответствии с критерием (8) оригинальный шаблон вида (4). Требуемое значение F_m амплитуды переколебаний вершины ДН составляло от 3 до 0.1 дБ.

Результаты синтеза ФАР с секторной ДН

$F_{m \text{ тр}}$, дБ	F_m , дБ	K_n	ξ_{m_0} , дБ	δ_1	δ_2	Номер рис.
3	3.0	0.76	-18.7	0.9931	-1.4130	рис. 4
2	1.7	0.73	-18.1	1.0650	-3.9818	рис. 5
1	0.8	0.70	-18.1	1.1368	208.00	рис. 6
0.3	0.3	0.68	-18.5	1.1875	8.8628	рис. 7
0.1	0.1	0.67	-18.9	1.2146	6.4839	рис. 8

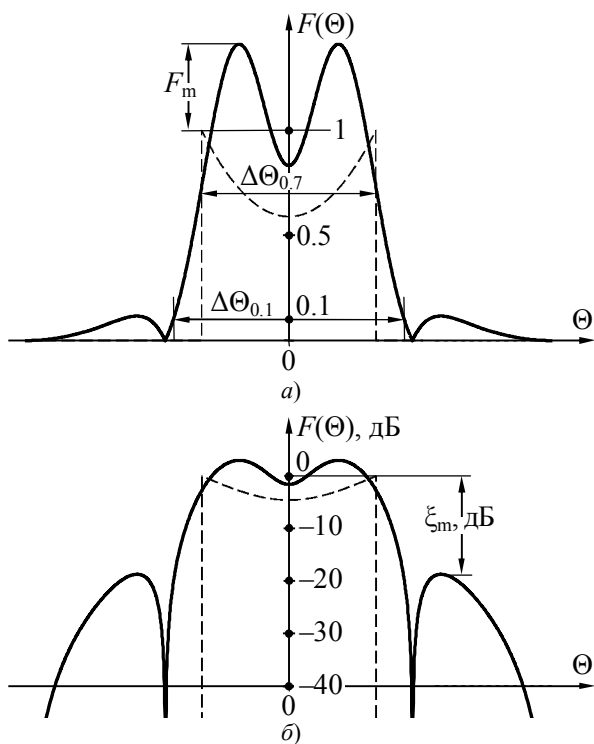


Рис. 4

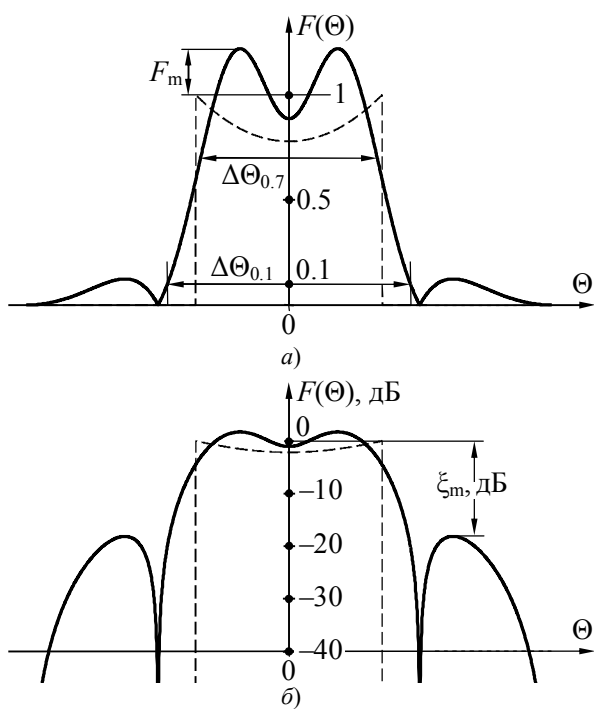


Рис. 5

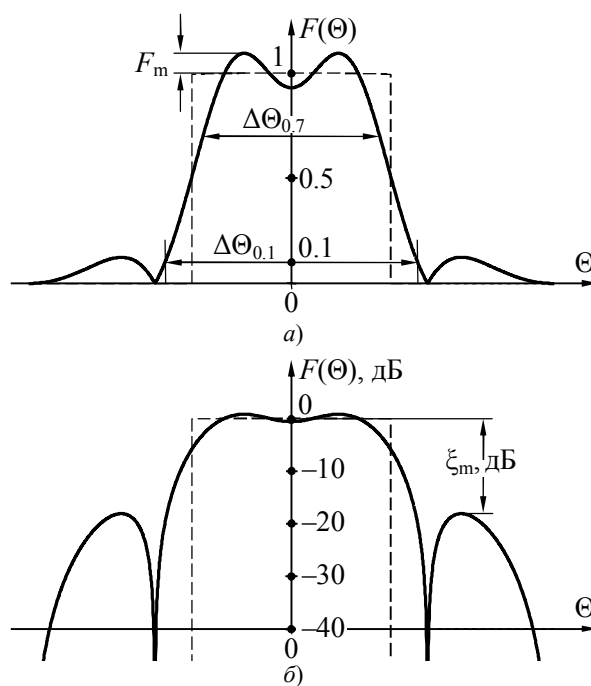


Рис. 6

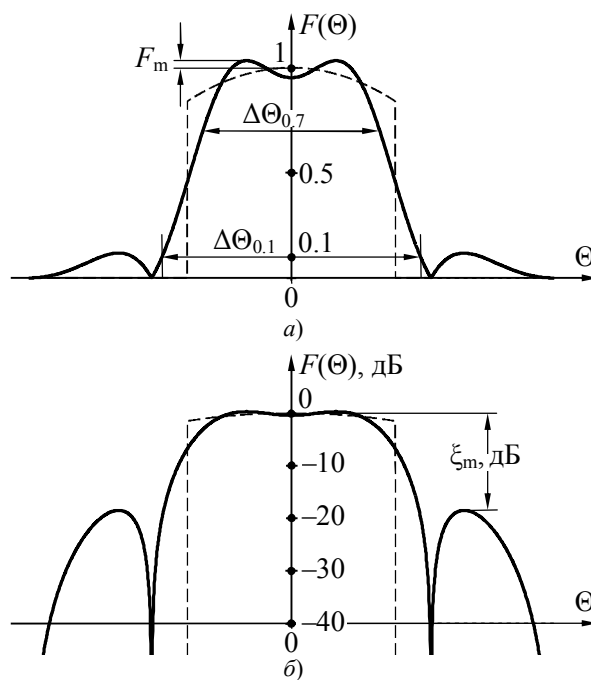


Рис. 7

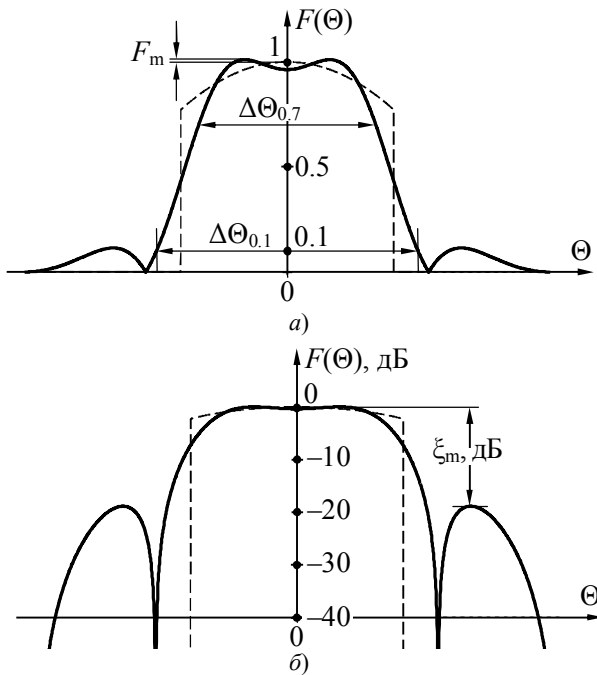


Рис. 8

Анализ результатов синтеза свидетельствует, прежде всего, о том, что применение оптимизированного шаблона приводит к точному соответствию ширины ДН по уровню «минус» 3 дБ $\Delta\Theta_{0.7}$ заданному сектору $\Delta\Theta$. Заметим, что при использовании прямоугольного шаблона ширина ДН меньше заданного сектора на 13 %.

Как и предполагалось, максимальная крутизна скатов ДН, характеризуемая коэффициентом прямоугোলности, достигается при наибольшей амплитуде переколебаний вершины ДН. Так, при амплитуде переколебаний вершины F_m в 3 дБ обеспечивается коэффициент прямоугোলности K_n , равный 0.76. Заметим, что при использовании строго прямоугольного шаблона коэффициент прямоугোলности ДН составляет всего 0.69. С уменьшением амплитуды переколебаний на каждый децибел коэффициент прямоугোলности ДН в среднем снижается на 4 %. Обеспечение амплитуды переколебаний вершины на уровне 0.1 дБ и меньше возможно при коэффициенте прямоугোলности K_n , равном 0.67 и меньшим почти на 12 % максимально достижимого значения $K_n = 0.76$ при амплитуде переколебаний в 3 дБ.

Интересна и форма оптимального шаблона. Так, при относительно больших реализуемых амплитудах переколебаний вершины ДН (в нашем случае, 3 и 2 дБ) вершины шаблона обладают выпуклостью вниз, при малых F_m – выпуклостью вверх.

Обращает внимание то обстоятельство, что для любых ограничений амплитуды переколебаний вершины ДН максимальный УБЛ остается в среднем неизменным (от «минус» 18 до «минус» 19 дБ). Последнее, скорее всего, объясняется неизменной формой шаблона в области полосы задерживания. Очевидно, что при необходимости снижения уровня бокового излучения ФАР используемый шаблон ДН должен быть усложнен, в частности, сглажен в области перехода от вертикальных скатов к нулевым значениям [4,5]. Однако в этом случае число параметров шаблона увеличивается как минимум вдвое, и для оптимизации шаблона придется использовать эволюционные методы решения поисковых задач [10].

Заклучение

Для улучшения показателей качества секторной ДН, формируемой линейной эквидистантной ФАР, при её синтезе использован шаблон оригинальной формы. Отличительной особенностью предложенного шаблона является минимальное число определяющих его форму параметров, позволяющее при оптимизации шаблона использовать процедуру прямого последовательного поиска. Доказано, что применение оптимизированного шаблона позволяет достичь улучшенных показателей секторной ДН, в частности, сниженных значений амплитуды переколебаний вершины ДН при максимальной крутизне её скатов, а также точного соответствия ширины ДН исходно заданному сектору.

Литература

1. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн: Фазированные антенные решётки и антенны с непрерывным раскрытием. М.: Сов. радио, 1980. 296 с.
2. Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д. Синтез излучающих систем (теория и методы расчета). М.: Сов. радио, 1974. 232 с.
3. Вендик О.Г., Парнес М.Д. Антенны с электрическим сканированием (введение в теорию). М.: Сайнс-Пресс, 2002. 232 с.
4. Митрохин В.Н., Пропастин А.А. Синтез излучающей системы, формирующей секторную диаграмму направленности с минимизацией эффекта Гиббса // Радиооптика. 2016. № 6. С. 1-13.
5. Кирпичева И.А., Останков А.В., Рябчунов А.И. Оптимизация шаблона для повышения эффективности синтеза антенной решетки с косекансной диаграммой направленности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 106-112.
6. A simple method for increasing the equal-amplitude non-uniform linear thinned array directivity / O.V. Chernoyarov, A.V. Salnikova, I.A. Kirpicheva, A.V. Ostankov // 5th

International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP 2019): proceedings. Marseille, France: IEEE Inc., 2019. P. 117-120.

7. Ostankov A.V., Antipov S.A., Razinkin K.A. Optimization of directional and energetic properties of diffraction antenna // *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 12. No 4. P. 3845-3864.

8. Hansen R.S. Phased antenna arrays. New York: Wiley, 2009. 550 p.

9. Vendik O.G., Kalinin S.A., Kozlov D.S. Phased array with controlled directivity pattern // *Technical Physics*. 2013. Vol. 58. No 10. P. 1507-1511.

10. Норенков И.П. Эволюционные методы для решения задач проектирования и логистики // База и генератор образовательных ресурсов. URL: <http://195.19.40.251/?cnt/?doc=3T5G8KDAB1H99LV4P8Y9> (дата обращения: 04.05.2021).

Поступила 11.05.2021; принята к публикации 18.06.2021

Информация об авторах

Останков Александр Витальевич — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: avostankov@mail.ru

Нечаев Артём Сергеевич — студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: temanechaev2000@mail.ru

Дашян Сергей Юрьевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор лаборатории им. Поля Пенлеве, Университет Лилля (59655, Франция, г. Вильнёв-д'Аск, Научный городок, корпус M2), e-mail: sergei.dachian@univ-lille1.fr

SYNTHESIS OF PHASED ARRAY ANTENNA WITH FLAT-TOPPED DIRECTIONAL PATTERN

A.V. Ostankov¹, A.S. Nechaev¹, S.Yu. Dachian²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France

Abstract: it is difficult to provide the specified indicators of the directivity quality of the flat-topped radiation pattern when synthesizing a phased array antenna using methods based on the expansion of the diagram into a generalized Fourier series. The reasons for the deterioration of the flat-topped radiation pattern indicators are the finite number of basic functions used in the synthesis and the space limitation of the amplitude-phase distribution at the array aperture. The purpose of the work is to show, using the example of a linear equidistant array antenna, that the use of an optimized template of the original form in the synthesis makes it possible to achieve improved indicators of the flat-topped radiation pattern. To ensure the predistortion of the radiation pattern, we proposed a template, one parameter of which determines the width, and the second, the degree of smoothness of the pattern vertex. A small number of template parameters make it possible, when optimizing it, to abandon the methods of evolutionary search and to simplify the synthesis procedure. Using specific examples, we show that the use of an optimized template allows you to achieve improved indicators of a flat-topped radiation pattern. As a result, it is possible to significantly reduce the amplitude of oscillations of the top of the radiation pattern at the maximum possible steepness of its fronts, as well as to achieve an exact match of the width of the pattern to the initially specified sector. The application of the presented synthesis technique allows designing linear phased arrays antenna for the formation of flat-topped radiation patterns with improved quality indicators

Key words: phased array antenna, flat-topped radiation pattern, synthesis, Kotelnikov series, template, optimization

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR and CNRS, project number 20-51-15001

References

1. Zelkin E.G., Sokolov V.G. "Antenna synthesis methods: Phased array antennas and antennas with continuous opening" ("Metody sinteza antenn: Fazirovannye antennye reshyotki i anteny s nepreryvnym raskryvom"), Moscow, Sovetskoe Radio, 1980, 296 p.
2. Bakhrakh L.D., Kremenetsky S.D. "Synthesis of radiating systems (theory and calculation methods)" ("Sintez izluchayushchikh sistem (teoriya i metody rascheta)"), Moscow, Sovetskoe Radio, 1974, 232 p.
3. Vendik O.G., Parnes M.D. "Antennas with electrical scanning (introduction to theory)" ("Antenny s elektricheskim skanirvaniem (vvedenie v teoriyu)"), Moscow, Sains-Press, 2002, 232 p.
4. Mitrokhin V.N., Propastin A.A. "Synthesis of the radiating system to form the flat-topped radiation pattern for phased array antennas with minimizing Gibbs phenomenon", *Radio Optics (Radiooptika)*, 2016, no. 6, pp. 1-13.
5. Kirpicheva I.A., Ostankov A.V., Ryabchunov A.I. "Optimization of the template to increase an effectiveness of synthesis of the antenna array with a cosecant pattern", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 106-112.
6. Chernoyarov O.V., Salnikova A.V., Kirpicheva I.A., Ostankov A.V. "A simple method for increasing the equal-amplitude non-uniform linear thinned array directivity", *2019 5th International Conference on Frontiers of Signal Processing (ICFSP 2019): proceedings*, Marseille, France, IEEE Inc., 2019, pp. 117-120.
7. Ostankov A.V., Antipov S.A., Razinkin K.A. "Optimization of directional and energetic properties of diffraction antenna", *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 3845-3864.

8. Hansen R.S. "Phased antenna arrays", New York, Wiley, 2009, 550 p.
9. Vendik O.G., Kalinin S.A., Kozlov D.S. "Phased array with controlled directivity pattern", *Technical Physics*, 2013, vol. 58, no. 10, pp. 1507-1511.
10. Norenkov I.P. "Evolutionary methods for solving design and logistics problems", ("Evolyutsionnye metody dlya resheniya zadach proyektirovaniya i logistiki"), *Base and generator of educational resources*, available at: <http://195.19.40.251/?cnt/?doc=3T5G8KDAB1H99LV4P8Y9> (date of access: 04.05.2021).

Submitted 11.05.2021; revised 18.06.2021

Information about the authors

Aleksandr V. Ostankov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru

Artem S. Nechaev, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: temanechaev2000@mail.ru

Sergey Yu. Dachian, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Paul Painleve Laboratory, University of Lille (Bâtiment M2, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve-d'Ascq, France), e-mail: serguei.dachian@univ-lille1.fr

АЛГОРИТМ ВЫПОЛНЕНИЯ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И МЕТОДА ПЕРИОДОГРАММ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ

Д.В. Козлов, А.Б. Степанов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: работа посвящена описанию предложенного авторами алгоритма выполнения частотно-временного анализа сигналов с применением непрерывного вейвлет-преобразования совместно с использованием метода периодограмм Уэлча. При этом приводятся два метода вычисления непрерывного вейвлет-преобразования на основе взаимно-корреляционной функции и на основе быстрого преобразования Фурье. Представлены результаты реализации данного алгоритма на различных графических процессорах (на одноплатных компьютерах с графическим ускорителем и дискретных видеокартах). Выполняются оценка скорости вычисления непрерывного вейвлет-преобразования от частоты дискретизации входного сигнала, оценка скорости вычисления непрерывного вейвлет-преобразования и метода периодограмм Уэлча от числа физических каналов, оценка скорости вычисления метода периодограмм Уэлча от количества частотных ячеек. Было произведено сравнение скорости выполнения двух методов вычисления непрерывного вейвлет-преобразования. Как показали проведённые исследования, среди рассмотренных графических процессоров наилучшие результаты продемонстрировала дискретная видеокарта Nvidia GTX1660 SUPER, которая позволила выполнить предложенный алгоритм за 32,5 мс. Показано, что данный алгоритм может применяться при анализе электроэнцефалограммы с целью определения ее частотного состава и локализации во времени ее основных видов особенностей (соответствующих патологии и артефактам)

Ключевые слова: непрерывное вейвлет-преобразование, реализация, графический процессор, периодограмма, метод Уэлча

Введение

При обработке сигналов широкое распространение получили методы, основанные на применении непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) [1, 2]. Вейвлеты – это обобщённое название функций с нулевым интегральным значением, локализованные по оси времени, способные к сдвигу и масштабированию. При анализе некоторых типов сигналов, помимо выявления в них основных частотных составляющих, также важно выделять информационные признаки, локализованные во времени, для чего могут быть использованы алгоритмы на основе непрерывного вейвлет-преобразования [3, 4].

Однако наравне с основным достоинством вейвлетов – возможностью применения при частотно-временном анализе, методы на основе вейвлет-преобразования имеют недостатки, связанные с их большой вычислительной сложностью. Это накладывает ограничения на выбор элементной базы для реализации алгоритмов на их основе.

В данной работе предлагается рассмотреть в качестве анализируемого сигнала элек-

троэнцефалограмму. Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) – это сигнал, который может быть зарегистрирован с поверхности головы человека и является результатом суммации и фильтрации электрических потенциалов отдельных групп нейронов [5, 6]. При анализе ЭЭГ важно выделять ее основные ритмы (α -, β -, θ -, γ - и др.), которые соответствуют определённым частотным диапазонам [5]. Помимо этого при анализе ЭЭГ необходимо выделять графоэлементы особой формы, характеризующие определённые физиологические состояния человека [7]. К таким графоэлементам относятся фрагменты ЭЭГ, соответствующие артефактам (явлениям, не связанным с деятельностью мозга) и патологическим состояниям. В связи с этим целесообразно использовать методы анализа на основе непрерывного вейвлет-преобразования.

Для детального анализа частотных составляющих в случайном сигнале используют различные методы оценки спектральной плотности мощности. Одним из таких методов является метод периодограмм [8]. Таким образом, при анализе ЭЭГ могут быть использованы комбинированные алгоритмы анализа сигналов, основанные на применении НВП и ме-

тогда периодограмм. Разработка таких алгоритмов является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка и реализация комбинированного алгоритма вейвлет анализа сигналов и метода периодограмм. В качестве используемой элементной базы рассматриваются графические процессоры, обладающие высокой производительностью и возможностью распараллеливания вычислительных потоков, что важно для анализа многоканальных сигналов, к которым относится электроэнцефалограмма.

Научная новизна данной работы заключается в разработке алгоритма на основе совместного использования НВП и метода периодограмм с дальнейшей его реализацией на графическом процессоре и оценка скорости его выполнения.

Данная работа является продолжением проведённых ранее исследований [9].

Методы исследования

Рассмотрим особенности применения непрерывного вейвлет-преобразования при анализе сигналов. Формула НВП сигнала $s(t)$ имеет вид:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

где $\psi(t)$ – вейвлет, a – масштаб, b – временной сдвиг.

Как было отмечено ранее, основным достоинством НВП является возможность определения информационных признаков в сигнале с их локализацией во времени и по частоте. Значительное влияние на результаты НВП оказывает выбор вейвлета. В данной работе в качестве вейвлета использовался вейвлет мексиканская шляпа. Выбор обусловлен типом анализируемого сигнала. Электроэнцефалограмма является гладким сигналом, форма ее деталей напоминает форму вейвлета мексиканская шляпа. В связи с этим, при выполнении НВП использование данного вейвлета позволяет на вейвлет-спектрограмме получить локализованный во времени и частоте отклик на определённые детали в сигнале. Кроме того, данный вейвлет имеет формализованное представление, что является достоинством при реализации алгоритма вычисления НВП. Однако необходимо отметить, что предлагаемый в данной работе алгоритм вычисления НВП позволяет использовать любой вейвлет.

При вычислении НВП могут быть использованы следующие методы [10]:

1. Метод, основанный на применении взаимно-корреляционной функции (ВКФ) сигнала и вейвлета. Данный метод может быть описан следующей формулой:

$$W(p, m) = \frac{1}{\sqrt{p}} \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \psi_p(n-m), \quad (1)$$

где p – дискретные значения коэффициента масштаба, m – дискретные значения сдвига, $\psi_p(n)$ – вейвлет с учетом коэффициента масштаба. Для вычисления НВП с помощью формулы (1) необходимо определить дискретную свертку сигнала с каждым масштабированным вейвлетом.

Достоинствами данного метода является его простота, возможность реализации на различной элементной базе. Также данный метод не требует аппаратной реализации быстрого преобразования Фурье (БПФ).

2. Метод, основанный на БПФ. Достоинствами данного метода является скорость вычисления и возможность использования стандартных встроенных библиотек или аппаратной реализации БПФ. Метод опирается на использование теоремы о свертке:

$$W(p, m) = FFT^{-1} [FFT(s) \cdot FFT(\psi_p)],$$

где $FFT\{\cdot\}$ – оператор прямого быстрого преобразования Фурье, $FFT^{-1}\{\cdot\}$ – оператор обратного быстрого преобразования Фурье.

Алгоритм

На рис. 1 приведена блок-схема предложенного авторами алгоритма выполнения частотно-временного анализа сигналов с применением непрерывного вейвлет-преобразования совместно с методом периодограмм. Данный алгоритм позволяет выполнять визуальный анализ вейвлет-спектрограмм и периодограмм, а также обеспечивает получение дополнительной информации о частотно-временном составе сигнала за счет использования специального блока обработки. Данный блок позволяет получить помимо качественных оценок вейвлет-коэффициентов и значений периодограммы также количественные. В простейшем случае для этого может использоваться пороговая обработка. Рассмотрим работу данного алгоритма.

Многоканальный сигнал заданной длины поступает на вход блоков вычисления НВП и вычисления периодограммы.

В блок вычисления НВП из блока управления поступает информация о заданном числе каналов и длине сигнала, вейвлет, используемый при вычислении НВП, а также вектор коэффициентов масштаба. На основе значений сигнала с учетом информации от блока управления выполняется вычисление непрерывного вейвлет-преобразования.

В блок вычисления периодограммы от блока управления поступает информация о длине сигнала, числе каналов, типе окна, а также о значении перекрытия окон. Блок вычисления периодограммы осуществляет расчет значений периодограммы методом Уэлча [11].

Значения вейвлет-коэффициентов, как правило, вычисляются медленнее, чем значения периодограммы, поэтому для обеспечения работы данного алгоритма используется блок синхронизации.

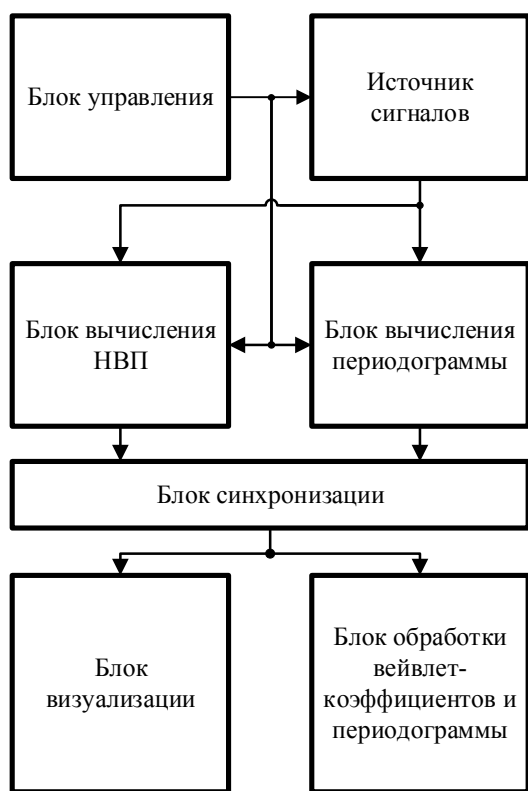


Рис. 1. Алгоритм выполнения частотно-временного анализа сигналов с применением НВП совместно с методом периодограмм

Полученные значения вейвлет-коэффициентов и периодограммы с помощью блока визуализации могут быть представлены

в виде графиков (вейвлет-спектрограммы и периодограммы).

Блок обработки вейвлет-коэффициентов и периодограммы позволяет получить количественные оценки результатов вычисления НВП и значений периодограммы.

С этой целью могут быть применены различные методы цифровой обработки сигналов. В данной работе предлагается использовать наиболее простой метод – метод пороговой обработки.

Реализация

При реализации рассмотренных алгоритмов вычисления непрерывного вейвлет-преобразования и метода периодограмм может применяться различная элементная база. В связи с необходимостью дополнительной реализации вспомогательных алгоритмов для анализа ЭЭГ целесообразно использовать высокопроизводительную элементную базу. К таким устройствам могут быть отнесены многоядерные цифровые сигнальные процессоры или графические процессоры. В связи с тем, что ЭЭГ является многоканальным сигналом, требующим при автоматизации процесса анализа гибкости при выборе методов анализа, в качестве вычислительного устройства в данной работе был выбран графический процессор. Достоинствами графического процессора является высокая производительность, достигающаяся за счет использования большого числа вычислительных потоков, а также возможности использования программно-аппаратной архитектуры CUDA (в случае использования графических процессоров фирмы Nvidia).

Технология CUDA – это программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений. Данная технология содержит набор программных средств и библиотек для организации параллельных вычислений на графических процессорах. Кроме того, CUDA предоставляет возможность производить управление памятью на графическом процессоре. При организации высокоскоростных вычислений на графическом процессоре необходимо брать во внимание пропускную способность памяти. Программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений CUDA обладает различными видами памяти, отличающимися доступным размером и пропускной способностью. Наиболее подходящим сценарием использования памяти для вычисления НВП с

применением метода ВКФ является использование константной и разделяемой памяти (Shared memory). В константную память целесообразно записывать отчеты семейства масштабированных вейвлетных функций, в то время как промежуточные результаты вычисления НВП необходимо записывать в разделяемую память.

При вычислении НВП методом, основанном на БПФ, возможно использование программных средств CUDA для вычисления БПФ в виде библиотеки cuFFT [12]. Библиотека cuFFT оптимизирована не только под эффективное вычисление БПФ для случая, когда размер входных данных является целой степенью числа 2, но и для случая, когда размер является степенями чисел 3, 5 или 7.

Основным недостатком технологии CUDA является то, что она может применяться только на графических процессорах от фирмы Nvidia. Аналогом для технологии CUDA можно отметить технологию OpenCL, область применения которой не ограничивается только графическими процессорами.

В последнее время на рынке появились одноплатные компьютеры общего назначения, содержащие в себе графический процессор. Такие одноплатные компьютеры позволяют производить высокоскоростные вычисления. В данной работе в качестве устройства для выполнения вычислений были выбраны одноплатные компьютеры серии Nvidia Jetson (Nano и TX2). Выбор данных одноплатных компьютеров связан с их малыми габаритами. Nvidia Jetson Nano также отличается низкой стоимостью среди аналогов, а Nvidia Jetson TX2 обладает высокой производительностью. А в качестве графического процессора для персонального компьютера были использованы дискретные видеокарты Nvidia GTX1050 (обладает средней производительностью среди дискретных видеокарт) и Nvidia GTX1660 Ti (отличается высокой производительностью).

Результаты эксперимента

Проведем серию экспериментов. В качестве анализируемого сигнала будем использовать фрагмент электроэнцефалограммы длиной 1 с., числом каналов 4 и частотой дискретизации 1024 Гц (рис. 2).

При проведении экспериментов были использованы следующие вычислительные устройства:

1. Nvidia Jetson Nano.

2. Nvidia Jetson TX2.
3. Nvidia GTX1050.
4. Nvidia GTX 1660 SUPER.

На рис. 3 представлены результаты работы блока визуализации предложенного алгоритма выполнения частотно-временного анализа сигналов с применением НВП совместно с использованием метода периодограмм. Как следует из рисунка, полученные периодограммы являются сглаженными и позволяют определить частотный состав анализируемого сигнала, а построенные вейвлет-спектрограммы локализовать частотные составляющие во времени.

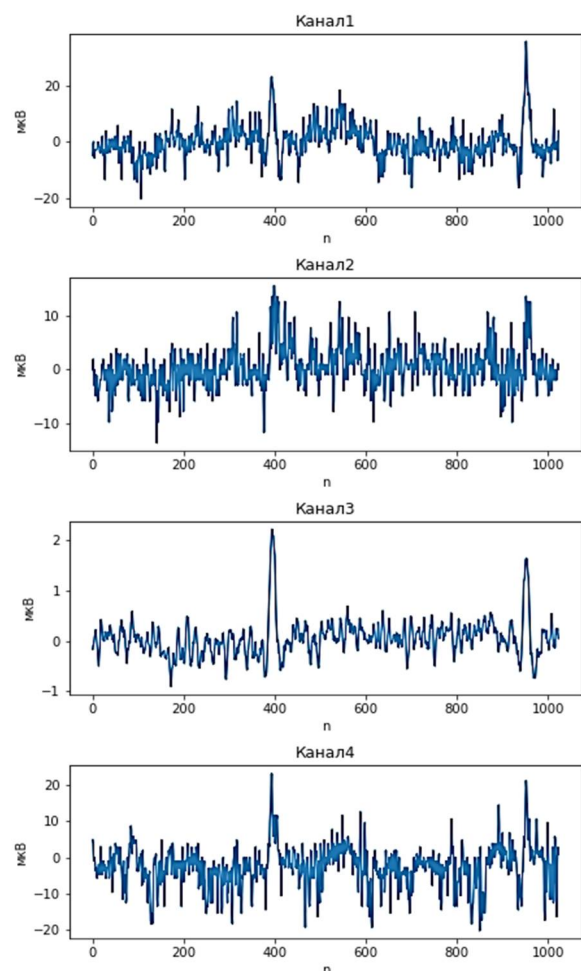


Рис. 2. Фрагмент электроэнцефалограммы

Была проведена серия экспериментов, в ходе которых были получены:

1. Оценка скорости вычисления НВП от частоты дискретизации входного сигнала.

В табл. 1 представлены результаты оценки скорости вычисления непрерывного вейвлет-преобразования в зависимости от выбранного метода вычисления (на основе ВКФ и на осно-

ве БПФ) и частоты дискретизации (от 256 Гц до 8192 Гц) при длительности сигнала 1 с.

Как следует из данной таблицы, для максимальной частоты дискретизации одноплатный компьютер Nvidia Jetson Nano (который является наименее производительным одноплатным компьютером среди рассмотренных) затрачивает время на вычисление алгоритма НВП равное 0,009 с. Это позволяет сделать вывод о возможности использования данного устройства на практике при анализе сигналов.

Скорость вычисления периодограммы методом Уэлча от частоты дискретизации в данной работе не рассматривается, поскольку она значительно выше, чем скорость вычисления НВП и не влияет на скорость выполнения предложенного алгоритма.

2. Оценка скорости вычисления НВП и метода периодограммы Уэлча от числа физических каналов.

В табл. 2 приведены результаты оценки скорости вычисления НВП и метода периодограммы Уэлча для сигналов с числом каналов от 2 до 256. Как следует из табл. 1 и табл. 2, при вычислении НВП наиболее быстрым методом является метод на основе БПФ по сравнению с методом на основе ВКФ. Сравнивая скорости вычисления алгоритмов НВП на основе БПФ и метода периодограмм Уэлча, было получено, что в среднем для большого числа физических каналов НВП вычисляется в 30 раз медленнее, чем периодограмма Уэлча.

Таблица 1

Оценка скорости вычисления НВП от частоты дискретизации входного сигнала

Метод	Устройство	Частота дискретизации, Гц					
		256	512	1024	2048	4096	8192
		Время вычисления, мкс					
ВКФ	Jetson Nano	14966	49294	53737	21070	41723	75785
	Jetson TX2	1900	2354	2836	3476	6901	12877
	GTX 1050	713	1302	1621	2604	3198	5955
	GTX 1660	676	1209	1478	1496	1560	1800
БПФ	Jetson Nano	3538	3498	3435	7003	8376	9195
	Jetson TX2	1186	1188	1168	1261	1707	3230
	GTX 1050	150	175	237	373	661	1206
	GTX 1660	115	131	151	338	293	507

Таблица 2

Оценка скорости вычисления НВП и метода периодограммы Уэлча от числа физических каналов

Метод	Устройство	Число каналов					
		2	4	16	64	128	256
		Время вычисления, мкс					
ВКФ	Jetson Nano	18587	33725	95324	254083	390259	776203
	Jetson TX2	3002	6722	22868	85328	168481	333244
	GTX 1050	1958	2992	10129	32934	58862	101060
	GTX 1660	1484	1551	4023	11948	23431	47255
БПФ	Jetson Nano	5304	11724	44173	171831	345382	560025
	Jetson TX2	2243	4238	16181	62783	125704	250808
	GTX 1050	438	846	3546	13610	25143	45431
	GTX 1660	283	545	2113	9110	17494	32547
Периодограммы Уэлча	Jetson Nano	98	153	1105	4675	9452	18989
	Jetson TX2	45	70	505	2140	4325	8690
	GTX 1050	9	14	104	440	889	1780
	GTX 1660	6	9	65	275	556	1117

3. Оценка скорости вычисления периодограммы методом Уэлча от количества частотных ячеек.

В табл. 3 приведены результаты измерений скорости выполнения алгоритма для различных значений количества частотных ячеек (точек на периодограмме), заданных в диапазоне от 256 до 4096. Результаты, приведённые в табл. 3, были визуализированы на рис. 4. Как следует из табл. 3 и рис. 4, наименьшее время выполнения алгоритма получено при использовании дискретной видеокарты GTX 1660 SUPER. Среди одноплатных компьютеров

наилучший результат показал Nvidia Jetson TX2. Также из рис. 4 следует, что для всех рассмотренных вычислительных устройств зависимость времени работы алгоритма от количества частотных ячеек имеет линейный закон, что важно для выполнения вычислений на практике. Сравнивая скорость выполнения алгоритмов для дискретной видеокарты GTX 1660, видно, что время выполнения алгоритма вычисления периодограммы Уэлча при количестве частотных ячеек 4096 соизмеримо с временем вычисления НВП (при одинаковой частоте дискретизации сигнала $f_d = 2048$ Гц).

Таблица 3

Оценка скорости вычисления периодограммы методом Уэлча от количества частотных ячеек

Устройство	Количество частотных ячеек				
	256	512	1024	2048	4096
	Время вычисления, мкс				
Jetson Nano	293	534	1098	2333	4953
Jetson TX2	214	471	1001	1981	3945
GTX 1050	27	50	93	183	366
GTX 1660	17	31	58	115	229

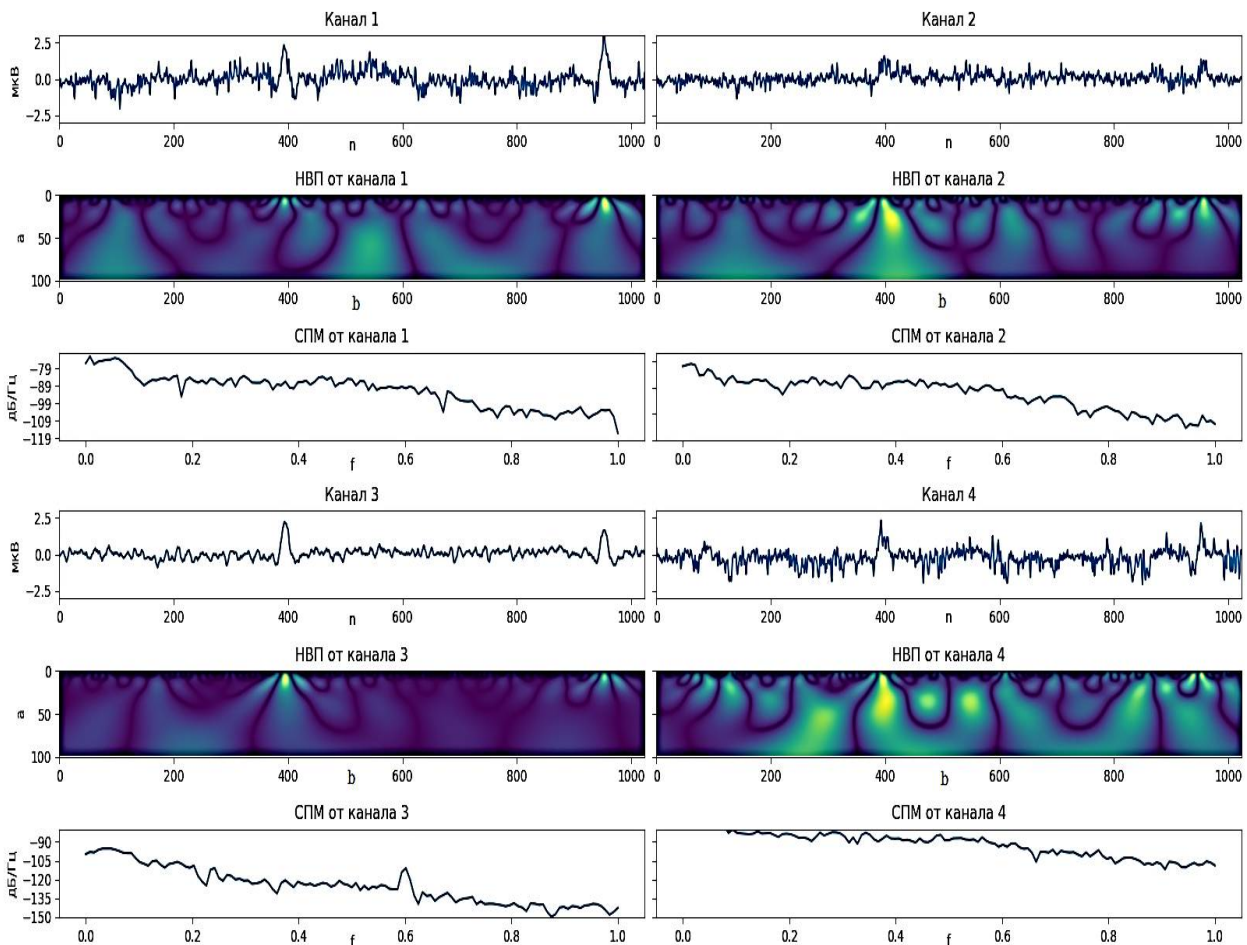


Рис. 3. Результат работы блока визуализации

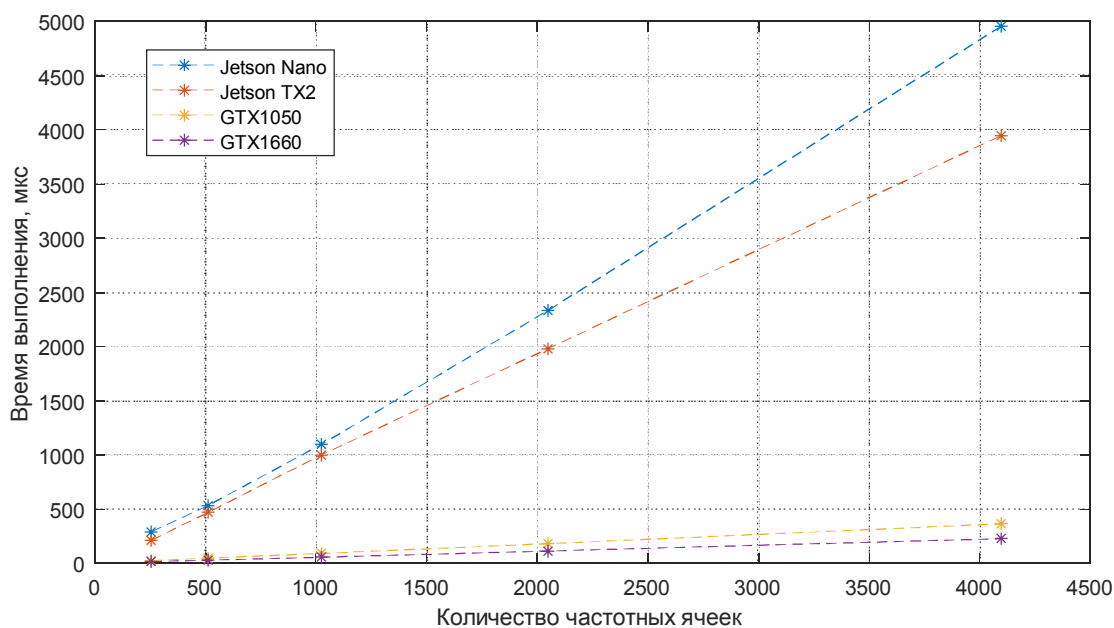


Рис. 4. Зависимость времени выполнения алгоритма вычисления периодограммы методом Уэлча от количества частотных ячеек

На рис. 5 представлены результаты работы блока обработки вейвлет-коэффициентов и периодограммы, получены результаты пороговой обработки фрагмента электроэнцефалограммы (рис. 5, а) длиной 1024 отчета, среза вейвлет-коэффициентов (рис. 5, б) и периодограммы Уэлча (рис. 5, в). Как видно из данного рисунка, на периодограмме могут быть определены локальные максимумы.

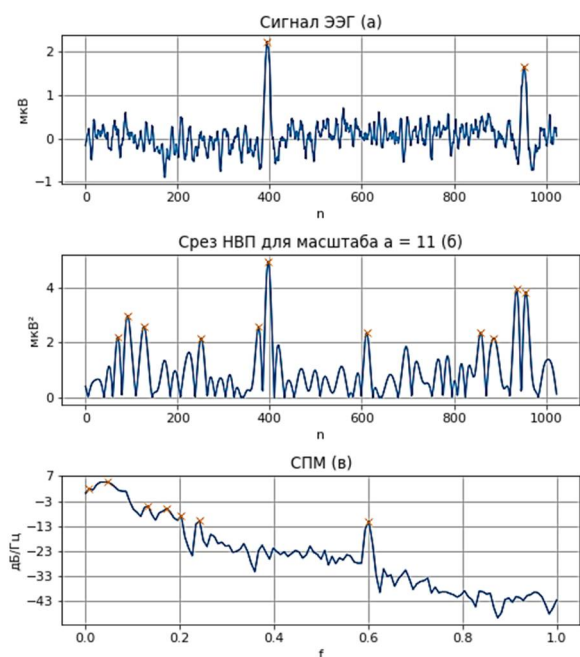


Рис. 5. Результат пороговой обработки

Для выполнения пороговой обработки значений вейвлет-коэффициентов, для масштаба $a = 11$, соответствующего частоте 2 Гц, был построен график среза матрицы вейвлет-коэффициентов (рис. 5, б). Данная частота является основной для графоэлемента, ярко выраженного в анализируемом сигнале электроэнцефалограммы.

Определение максимумов сигнала во временной области позволяет грубо оценить наличие и определить момент времени появления графоэлемента, присутствующего в сигнале ЭЭГ.

Пороговая обработка вейвлет-коэффициентов, полученных для основной частоты исследуемой детали сигнала, позволяет провести более тонкий ее анализ.

Максимумы на периодограмме позволяют определить наличие доминантных частотных составляющих, в том числе подлежащих удалению. Спектральная плотность мощности позволяет оценить энергию частотных диапазонов, советуемых определённым ритмам ЭЭГ.

Таким образом, блок обработки вейвлет-коэффициентов и периодограммы позволяет определить пороговые значения (определить максимумы) представления сигнала во временной и частотной областях, а также в частотно-временной плоскости.

Заключение

В качестве основных результатов данной работы можно отметить следующее:

1. Предложен алгоритм выполнения частотно-временного анализа сигналов с применением непрерывного вейвлет-преобразования и совместным использованием алгоритма частотного анализа сигнала с помощью вычисления значений периодограммы методом Уэлча. Данный алгоритм реализован на графических процессорах с технологией CUDA.

2. На одноплатных компьютерах Jetson Nano и TX2 и на дискретных видеокартах GTX 1050Ti и GTX1660 реализованы алгоритмы вычисления периодограммы по методу Уэлча и два алгоритма вычисления непрерывного вейвлет-преобразования:

- на основе взаимно-корреляционной функции сигнала и вейвлета;
- на основе быстрого преобразования Фурье.

3. Как показали результаты проведенных исследований, наибольшая скорость вычисления непрерывного вейвлет-преобразования и метода периодограмм Уэлча была достигнута на дискретной видеокарте Nvidia GTX 1660 SUPER. При вычислении непрерывного вейвлет-преобразования для сигнала длительностью 1 с с частотой дискретизации 2048 Гц и числом каналов 256 потребовалось 32,5 мс (при использовании метода на основе БПФ). Для данного числа физических каналов при использовании дискретной видеокарты Nvidia GTX 1660 SUPER для вычисления значений периодограммы методом Уэлча потребовалось 1,12 мс. Для данного числа каналов и элементной базы видно, что алгоритм вычисления НВП работает в 29 раз медленнее по сравнению с алгоритмом вычисления периодограммы методом Уэлча.

4. Скорость выполнения алгоритма вычисления НВП для дискретной видеокарты GTX 1660 соизмерима с временем выполнения алгоритма вычисления периодограммы Уэлча при количестве частотных ячеек 4096 при одинаковой частоте дискретизации сигнала (2048 Гц).

5. Приведен результат работы блока обработки вейвлет-коэффициентов и периодограммы при использовании пороговой обработки сигнала, вейвлет-коэффициентов и периодограммы Уэлча.

6. При реализации алгоритмов на основе непрерывного вейвлет-преобразования и метода периодограмм для сигналов электроэнцефалограммы среди рассмотренной элементной базы для разработки портативных устройств целесообразно использовать Nvidia Jetson Nano, так как он обладает малыми габаритами и низкой стоимостью. При проведении дальнейших исследований планируется применить полученные результаты при реализации портативного электроэнцефалографа, позволяющего выполнять постобработку ЭЭГ.

Литература

1. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. 58 с.
2. Continuous Wavelet Transform Calculator for Operation in Ultra-Low Temperatures of the Arctic and Antarctic/ A.B. Stepanov, V.S. Gribanov, M.M.H. Ayedh, A.V. Pomogalova, A.E. Kopylov // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EI-ConRus). 2020. Pp. 1432-1436.
3. Stark H.-G. Wavelets and Signal Processing. Berlin: Springer, 2005. 158 p.
4. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК-Пресс, 2005. 304 с.
5. Зенков Л.Р., Ронкин М.А. Функциональная диагностика нервных болезней: руководство для врачей. М.: МЕДпресс-информ, 2011. 448 с.
6. Кропотов Ю.Д. Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия. Донецк: Изд. Заславский А.Ю., 2010. 512 с.
7. Арбузов С.М., Степанов А.Б. Применение методов вейвлет-анализа в электроэнцефалографии. СПб.: Линк, 2009. 104 с.
8. Цифровая обработка сигналов и MATLAB/ А.И. Солонина, Д.М. Клионский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 560 с.
9. Kozlov D.V. and Stepanov A.B. The Main Features of a Multichannel Continuous Wavelet Transform Implementation on the Nvidia Jetson Single Board Computers // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021. pp. 1632-1636.
10. Zhuravov D.V., Stepanov A.B. Application of Simulink in the Implementation of Calculation Algorithms for Continuous Wavelet Transform on a Digital Signal Processor // Journal of Radio Electronics. 2019. Vol. 5. Pp. 12.
11. Welch P. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms// IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1967. Vol. 15. No. 2. pp. 70-73.
12. Nvidia corp. The API reference guide for cuFFT, the CUDA Fast Fourier Transform Library. URL: https://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUFFT_Library.pdf (дата обращения: 25.05.2021).

Поступила 26.04.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

Козлов Денис Витальевич – студент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1), e-mail: kozlov.dv@spbgut.ru

Степанов Андрей Борисович – канд. техн. наук, заместитель директора института магистратуры по учебной работе, доцент кафедры радиосистем и обработки сигналов, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, к. 1), e-mail: sabarticle@yandex.ru, тел. +7(812)3263161, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6876-729X>

TIME-FREQUENCY SIGNAL ANALYSIS ALGORITHM USING CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM AND WELCH'S PERIODOGRAM METHOD WITH ITS IMPLEMENTATION ON GRAPHICAL PROCESSING UNIT

D.V. Kozlov, A.B. Stepanov

Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia

Abstract: in the work we describe the algorithm for performing time-frequency analysis of the signals using continuous wavelet transform together with the use of the Welch's periodogram method. At the same time, we present two methods for calculating the continuous wavelet transform based on the cross-correlation function and on the basis of the fast Fourier transform. We give the results of the implementation of this algorithm on various graphics processors (on single-board computers with a graphics accelerator and discrete video cards). We performed the estimation of the computation speed of the continuous wavelet transform from the sampling frequency of the input signal, the evaluation of the computation speed of the continuous wavelet transform and the Welch periodogram method from the number of physical channels, the evaluation of the computation speed of the Welch periodogram method from the number of frequency cells. We compared the execution speed of the two methods for calculating the continuous wavelet transform. As the studies have shown, among the considered graphics processors, the best results were demonstrated by the discrete Nvidia GTX1660 SUPER graphics card, which made it possible to execute the proposed algorithm in 32.5 ms. We show that this algorithm can be used in the analysis of an electroencephalogram in order to determine its frequency composition and localization in time of its main types of features (corresponding to pathology and artifacts)

Key words: continuous wavelet transform, implementation, graphical processing unit, periodogram, Welch's method

References

1. Vityazev V.V. "Wavelet time series analysis" ("Veyvlet-analiz vremennykh ryadov"), St. Petersburg, Publishing House of St. Petersburg University, 2001, 58 p.
2. Stepanov A.B., Griбанov V.S., Ayedh M.M.H., Pomogalova A.V., Kopylov A.E. "Continuous wavelet transform calculator for operation in ultra-low temperatures of the arctic and antarctic", *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2020, pp. 1432-1436.
3. Stark H.-G. "Wavelets and signal processing", Berlin, Springer, 2005, 158 p.
4. Smolentsev N.K. "Fundamentals of wavelet theory. Wavelets in MATLAB" ("Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB"), Moscow, DMK-Press, 2005, 304 p.
5. Zenkov L.R., Ronkin M.A. "Functional diagnostics of nervous diseases: a guide for physicians" ("Funksional'naya diagnostika nervnykh bolezney: rukovodstvo dlya vrachey"), Moscow, MEDpress-inform, 2011, 448 p.
6. Kropotov Y.D. "Quantitative EEG, cognitive evoked potentials of the human brain and neurotherapy" ("Kolichestvennaya EEG, kognitivnyye vyzvannyye potentsialy mozga cheloveka i neyroterapiya"), Donetsk, Publishing house of Zaslavsky A.U., 2010, 512 p.
7. Arbutov S.M., Stepanov A.B. "Application of methods of wavelet analysis in electroencephalography" ("Primenenie metodov veyvlet-analiza v elektroentsefalografii"), Saint Petersburg, Link, 2009, 104 p.
8. Solonina A.I., Klionsky D.M., Merkucheva T.V., Perov S.N. "Digital signal processing and MATLAB" ("Tsifrovaya obrabotka signalov i MATLAB"), Saint Petersburg, BHV-Petersburg, 2013, 560 p.
9. Kozlov D.V., Stepanov A.B. "The main features of a multichannel continuous wavelet transform implementation on the Nvidia Jetson single board computers", *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 1632-1636.
10. Zhuravov D.V., Stepanov A.B. "Application of Simulink in the implementation of calculation algorithms for continuous wavelet transform on a digital signal processor", *Journal of Radio Electronics*, 2019, vol. 5, pp. 12.
11. Welch P. "The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms", *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, June 1967, vol. 15, no. 2, pp. 70-73.
12. Nvidia corp. "The API reference guide for cuFFT, the CUDA Fast Fourier Transform library", available at: https://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUFFT_Library.pdf (access date: 25.05.2021)

Submitted 26.04.2021; revised 21.06.2021

Information about the authors

Denis V. Kozlov, student, Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications (22 Bol'shevnikov prospekt, St. Petersburg 193232, Russia), e-mail: kozlov.dv@spbgut.ru

Andrey B. Stepanov, Cand. Sc. (Technical), Deputy Director of Academic Affairs of the Master's degree Institute, Associate Professor, Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications (22 Bol'shevnikov prospekt, St. Petersburg 193232, Russia), e-mail: sabarticle@yandex.ru, tel.: +7(812) 326 31 61, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6876-729X>

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ СТАНЦИЙ
СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТАХ**Д.Г. Пантенков¹, В.П. Литвиненко²¹АО «Кронштадт», г. Москва, Россия²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в настоящее время повсеместное применение находят системы спутниковой связи, позволяющие осуществлять информационно-командный обмен между различными удаленными абонентами как фиксированными, так и подвижными. Любая система спутниковой связи непременно состоит из земной станции спутниковой связи (ЗССС) и множества абонентских терминалов (АТм) различного базирования (авиационных, морских и т.д.) и вариантов исполнения (носимых, возимых, устанавливаемых на подвижных объектах и т.д.). При этом зачастую особо важную роль играет качество разрабатываемых технических систем и устройств, непосредственным образом влияющее на эффективность решения поставленных целевых задач объектов, в состав которых входит данное оборудование. В статье под качеством оборудования понимается его надежность при эксплуатации, которая поддается количественной оценке, зависящей от целого ряда факторов. Представлены основные подходы к решению поставленной задачи, приведены ключевые требования к надежности ССС, а также представлен методический аппарат для определения надежности с учетом специфики решаемой задачи. Целью статьи является разработка научно-методического аппарата оценки показателей надёжности проектируемых станций спутниковой связи. Методический аппарат учитывает основные функционально связанные между собой показатели надёжности – время средней наработки на отказ, среднее время восстановления, коэффициент готовности изделия. Методические положения выполнения расчётов для формирования программы обеспечения надежности (ПОН) базируются на последовательном определении состава и структурной схемы надёжности (ССН) изделия, математической модели для каждого элемента и изделия в целом, определяющей основные расчётные соотношения для определения программы обеспечения надежности, учитывают основные технические ограничения. Оценка показателей надёжности компонентов (элементов, устройств) изделия осуществляется по иерархии структурной схемы надежности «снизу-вверх», поэтому значения показателей надёжности компонентов нижележащего уровня являются исходными данными для вычисления значений показателей надёжности компонентов вышележащего уровня. Разработанная методика является универсальной, инвариантной к входным параметрам и может быть применена для других систем (станций) из состава радиолинии спутниковой радиосвязи. Практическая значимость статьи заключается в возможности получения количественных оценок показателей надёжности спутниковых станций еще на этапе ведения аванпроекта при обосновании проектных параметров аппаратуры или формирования тактико-технических заданий (ТТЗ) на выполнение опытно-конструкторских работ (ОКР)

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

Введение

Как показал проведенный анализ [1-15], работа по обеспечению надёжности авиационной (АТ) и ракетно-космической техники (РКТ) начинается со сбора информации и статистики о времени наработки на отказ её ключевых элементов в соответствии со схемой деления. От характера, полноты, достаточности и точности статистической информации об отказах во многом зависит правильность принимаемых решений Заказчиком, предприятиями-разработчиками и выявление проблем при отработках РКТ предприятиями-изготовителями.

Следующим важным этапом является классификация отказов и причин их возникновения. С целью выявления и предотвращения

всех возможных причин отказов, оказывающих влияние на безотказность и безопасность функционирования АТ и РКТ, в соответствии с требованиями технического регламента и стандартов, проводится анализ прогнозируемых последствий потенциальных эксплуатационных опасностей (отказов) при следующих допущениях и признаках критичности отказов: одновременное появление двух и более независимых отказов считается маловероятным событием; состояние подсистемы (элемента) до момента наступления возможного отказа предполагается исправным; известны типовые признаки отказов.

Под критичностью отказа в общем случае понимается совокупность признаков, характеризующих последствия отказа АТ и РКТ, их составных частей и изделий. Следует указать, что критичность изделий АТ и РКТ может

определяться как совокупностью критериев, определяющих их качество (по показателям надёжности), так и потенциальными нежелательными последствиями в виде нанесения вреда, ущерба (по показателям безопасности), которые могут возникнуть при их отказах. Критериями для определения критичных элементов могут быть: недостаточный уровень надёжности элементов, связанный с новизной и недостаточной изученностью конструкции, применяемых материалов или технологических процессов изготовления; напряженные (утяжеленные) условия применения (эксплуатации); высокая чувствительность к внешним условиям процессов эксплуатации в реальном масштабе времени (РМВ); ограничения применения элементов, связанные со сроками хранения [1-6].

Критичные элементы изделий АТ и РКТ выявляются по перечисленным выше критериям путем тщательного анализа технической документации на составные части и элементы, входящие в состав АТ и РКТ, данных по результатам предварительных испытаний, выполняемых поставщиками комплектующих изделий и т.д. Данные об отказах, наряду с показателями уровня надёжности конкретных типов АТ и РКТ, позволяют обосновать и выбрать адекватную математическую модель отказов, которая используется для аналитического прогнозирования уровня надёжности вновь разрабатываемых систем и всех инженерных расчётов надёжности в течение всего их жизненного цикла. Отметим, что потенциальные ошибки персонала, не учтенные воздействия внешней среды, недостоверность результатов контрольных испытаний и диагностики, а также дефекты и отказы комплектующих компонентов и элементов составных частей АТ и РКТ, могут рассматриваться как субъектно-объектные модели, характеристики которых (истинность, адекватность, точность, быстродействие и др.) зависят от базы знаний, опыта, интуиции исследователей, экспертов; имеющейся актуальной базы данных, включая данные по изделиям-аналогам, другие субъективные факторы разработчиков и изготовителей АТ и РКТ.

Такого класса математические модели нуждаются в проверке адекватности и необходимых доказательствах правильности тех предположений, начальных условий и ограничений, на которых они разработаны, иными словами, эти модели нуждаются в производственной и эксплуатационной верификации.

Общие методические положения оценки показателей надёжности изделий станций спутниковой связи

В целях оценки основных показателей надёжности станций спутниковой связи (ССС) для высокоскоростных радиолиний (ВРЛ) и командных радиолиний (КРЛ) разработан научно-методический аппарат, который включает следующие базовые положения.

Аппаратура ССС ВРЛ и КРЛ относится к ремонтному (восстанавливаемому) изделиям, характеризуемым следующими функционально связанными между собой показателями надёжности:

- среднее время работы между двумя соседними отказами T или средняя наработка на отказ T_0 ;

- среднее время восстановления T_v ;

- коэффициент готовности изделия K_g .

Известно [1, 3, 6], что средняя наработка на отказ T_0 и среднее время восстановления T_v определяют основной показатель надёжности восстанавливаемых изделий (систем, блоков, устройств, плат и т.д.), которым является коэффициент готовности изделия K_g .

Величина среднего времени восстановления T_v представляет собой математическое ожидание продолжительности восстановления изделия после отказа, т.е. среднее время вынужденного, нерегламентированного простоя, вызванного отысканием причины и устранением отказа.

Следует отметить, что из трех взаимосвязанных показателей надёжности восстанавливаемых изделий (K_g , T_v и T_0) в требованиях задаются, как правило, только два из этих показателей, обосновывая это тем, что третий показатель находится в функциональной взаимосвязи и может быть определён по двум заданным показателям.

ССС ВРЛ и КРЛ по числу допустимых работоспособных состояний относится к изделиям периодического непрерывного применения (эксплуатации), в том числе длительного применения, причём восстанавливаемым, обслуживаемым, контролируемым перед применением, ремонтным обезличенным способом.

Под работоспособным состоянием изделия понимается состояние, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, при котором значение хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации.

Критерием отказа является признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленных в нормативно-технической и/или конструкторской (проектной) документации.

Комплексный анализ сложных технических систем, к которым относятся ССС ВРЛ и КРЛ показал, что принципиально возможно деление неработоспособных состояний этих объектов на некоторые самостоятельные группы. При этом из множества неработоспособных состояний целесообразно выделить частично неработоспособные состояния, при которых изделие ССС ВРЛ и КРЛ способно частично выполнять требуемые функции с заданной эффективностью применения (эксплуатации) по целевому назначению [16-19].

На основе приведенных определений признаков работоспособного и неработоспособного состояний путём условного разделения совокупности допустимых уровней качества функционирования ВРЛ и КРЛ на две группы, в качестве критерия отказа ССС ВРЛ и КРЛ принимается состояние, в котором вследствие отказа составной части (системы, узла, элемента) изделия не обеспечивается решение хотя бы одной из основных функциональных задач по предоставлению потребителям каналов спутниковой связи для ВРЛ и КРЛ.

Требования надёжности к станциям спутниковой связи для высокоскоростных командных радиолиний

В состав рассматриваемых в данной статье ССС ВРЛ и КРЛ входят:

– абонентская земная станция (АЗС) Ku-диапазона на базе антенной системы SOTM (Satcom-On-The-Move) с эквивалентным диаметром рефлектора 0,6 м, устанавливаемая на пилотируемом или беспилотном летательном аппарате (БЛА) и обеспечивающая работу по ВРЛ и КРЛ в полёте;

– подвижная земная станция (ПЗС) Ku-диапазона на базе антенной системы типа SNG/Driveaway с эквивалентным диаметром рефлектора 2,4 м, устанавливаемая на транспортном средстве и обеспечивающая работу по ВРЛ и КРЛ на остановках/стоянках.

К ССС ВРЛ и КРЛ в качестве критериев установим следующие требования к показателям надёжности (ПН):

1) коэффициент готовности проектируемой станции – не менее 0,9975.

2) среднее время восстановления работоспособного состояния наземных технических средств – не более 30 мин. Для восстановления работоспособности технических средств составных частей станций должен использоваться комплект ЗИП.

3) вероятность безотказной работы в течение суток – не менее 0,98.

4) срок эксплуатации технических средств – не менее 15,5 лет.

5) станции должны быть оснащены необходимым набором ремонтно-измерительных средств, достаточных для проведения оперативного ремонта.

6) выполнение требований по надёжности должно быть подтверждено по окончании наземной экспериментальной отработки (НЭО) станций и их участия в испытаниях объекта Заказчика.

Кроме того, одной из задач проектирования является расчет K_r радиолиний спутниковой связи с проектируемыми ССС.

Реализация вышеперечисленных требований к показателям надёжности создаваемых изделий обеспечивается следующими организационно-техническими мероприятиями:

– применением высоконадёжных покупных составных частей (блоков, устройств и других комплектующих);

– структурно-функциональным построением изделий ССС и их составных частей с применением резервирования наиболее важных устройств;

– оснащением изделий ССС комплектом ЗИП, состав которого определяется с учётом предъявляемых требований к показателям надёжности применяемой системы ремонта и технического обслуживания (ТО);

– оснащением изделий ССС необходимым набором ремонтно-измерительных средств, достаточных для проведения ТО и оперативного ремонта;

– применением по целевому назначению изделий ССС в соответствии с рекомендациями, изложенными в их эксплуатационной документации (ЭД).

Методика расчёта показателей надёжности изделий ССН

Расчёт основных показателей надёжности (ПН) изделий ССН выполняется аналитическим методом по известным величинам наработки на отказ T_i или связанным с ними математическим выражением интенсивностям отказов λ_n элементов (устройств), входящих в состав изделия ССН.

Методика выполнения расчёта ПН предусматривает последовательное определение состава и структурной схемы надёжности изделия, математической модели для каждого элемента и изделия в целом (резервированный или нерезервированный прибор, нагруженный или ненагруженный резерв и др.), определяющей основные расчётные соотношения для определения ПН.

Расчёты ПН изделий ССН с учетом их специфики и особенностей проектирования и эксплуатации выполняются с учётом следующих принимаемых ограничений:

- расчёт производится для периода нормальной эксплуатации, когда наблюдается постоянство во времени интенсивностей отказов λ всех элементов;

- отказы элементов (блоков, устройств) являются внезапными и представляют собой случайные независимые события;

- время работы до отказа элементов является случайной величиной, распределённой по экспоненциальному закону с постоянным параметром λ ;

- элементы и приборы, выполняющие вспомогательные функции и не оказывающие существенного влияния на работоспособность аппаратуры, из расчёта могут быть исключены;

- вероятность отказа двух и более элементов в течение времени восстановления пренебрежимо мала;

- восстановление работоспособности составных частей изделий осуществляется путём замены отказавшего устройства на устройство из комплекта ЗИП с восполняемыми запасами, обеспечивающими требуемую величину среднего времени восстановления, или путём ремонта отказавшего прибора, если аналогичный исправный прибор отсутствует в составе ЗИП.

Изделие в целом и его каждая составная часть при обосновании и разработке их математических моделей рассматриваются как восстанавливаемые системы, состав основных элементов которых известен, а структурная схема надёжности (ССН) имеет вид последовательной

системы из m восстанавливаемых элементов. Отказ любого из m элементов приводит к отказу одного из основных трактов или к отказу изделия в целом. С учётом вышеизложенных ограничений, коэффициент готовности изделия K_r определяется произведением коэффициентов готовности его расчётных элементов согласно ССН [1, 3, 6].

Расчёт показателей надёжности компонент (элементов, устройств) изделия осуществляется по иерархии ССН «снизу-вверх», так что значения показателей надёжности компонентов нижележащего уровня являются исходными данными для вычисления значений показателей надёжности компонентов вышележащего уровня. При этом вычисления показателей надёжности на всех уровнях иерархии ССН выполняются по однотипным формулам, определяемых математической моделью оцениваемого элемента, в следующей последовательности:

1. Формируются исходные данные для расчёта показателей надёжности изделия, включающие в себя перечень (состав) оборудования, составляющего ССН, и следующие данные по каждому виду оборудования:

- количество однотипных устройств k_i i -го элемента оцениваемой системы, состоящей из m основных (рабочих) элементов;

- количество резервных устройств;

- средняя наработка на отказ T_i каждого i -го элемента (на основании подтвержденных значений наработки на отказ по известным результатам эксплуатации оборудования в сетях спутниковой связи, либо на заявленных производителем оборудования значений средней наработки на отказ, либо на определяемых наработках, основываясь на значениях наработки на отказ блоков, близких по параметрам и надёжности);

- среднее время восстановления τ_i каждого i -го элемента;

- модель системы, определяющая выражение для расчёта коэффициента готовности каждого i -го элемента.

2. На основании значений средней наработки на отказ T_i каждого i -го элемента (или каждой резервированной системы, рассматриваемой как элемент изделия) определяются интенсивности отказов составных частей i -го типа λ_i , $i = \overline{1, m}$ для рабочего режима, как отношение числа отказов восстанавливаемого элемента за достаточно малую его наработку к значению этой наработки.

С учётом принятых выше ограничений при ординарном потоке отказов параметр λ_i для группы из нескольких однотипных элементов определяется согласно выражению:

$$\lambda_i = \frac{1}{T_i} \cdot k_i, \quad (1)$$

где k_i – количество однотипных блоков i -го элемента в изделии ССС.

3. С учётом принятых ограничений показатели надёжности изделия ССС, состоящего из n последовательно соединённых элементов с интенсивностями отказов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n$, рассчитываются по следующим формулам:

– интенсивность отказов изделия λ_n равна сумме интенсивностей отказов его расчетных элементов λ_i [1-15]:

$$\lambda_n = \sum_i \lambda_i; \quad (2)$$

– среднее время безотказной работы или средняя наработка на отказ изделия ССС в целом T_o определяется как величина, обратно пропорциональная суммарной интенсивности отказов его элементов λ_n :

$$T_o = 1/\lambda_n; \quad (3)$$

– среднее время восстановления системы в целом T_b :

$$T_b = \frac{1}{\sum_i \lambda_i} \cdot \sum_i (\lambda_i \cdot \tau_i), \quad (4)$$

где λ_i - интенсивность отказов i -го элемента; τ_i - среднее время восстановления i -го элемента;

– вероятность безотказной работы изделия $P(t)$ в течение времени боевой работы t для периода нормальной эксплуатации ССС при постоянной величине интенсивности отказов, когда $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ определяется выражением:

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}; \quad (5)$$

– коэффициент готовности для нерезервированного прибора, используемого постоянно и восстанавливаемого путём ремонта или замены на исправный из состава ЗИП, определяется по классической формуле через наработку на отказ T_o и среднее время восстановления T_b , задаваемое, обычно, без учёта времени доставки исправного из ЗИП, считающимся с неограниченными запасами [1-15]:

$$K_r = T_o / (T_o + T_b); \quad (6)$$

– коэффициент готовности для нерезервированного прибора, используемого периодически:

$$K_r(t) = K_r + \frac{\tau}{T + \tau} \cdot e^{-\left(\frac{1}{T} + \frac{1}{\tau}\right) \cdot t}, \quad (7)$$

где K_r – коэффициент готовности, рассчитываемый по формуле (6); t – время выполнения данной функции;

– при наличии ЗИП с ограниченными запасами выражение для величины K_r изделия примет вид:

$$K_r = T_o / (T_o + T_b + \Delta t_{\text{зип}}), \quad (8)$$

где $\Delta t_{\text{зип}}$ – логистическая задержка доставки требуемого элемента органами снабжения.

4. Для резервированных по схеме 1:1 восстанавливаемых устройств (блоков, модулей с «горячим» резервом или методом замещения «холодного» резерва) показатели надёжности при неограниченном восстановлении определяются выражениями:

– средняя наработка на отказ T_o :

$$T_o = T_{o3} + (T_{o3}^2 / 2T_{b3}), \quad (9)$$

где T_{o3} – наработка на отказ одного элемента; T_{b3} – время восстановления одного элемента.

– коэффициент готовности K_r :

$$K_r = 1 - (\beta^2 / (1 + \beta)^2), \quad (10)$$

где $\beta = T_{b3} / T_{o3}$.

Отметим важное обстоятельство, что требование к величине интегрального показателя надёжности – коэффициенту готовности K_r изделия ССС с учётом их особенностей функционирования, который в данном случае должен быть не ниже **0,9975**, может быть обеспечено при различных значениях величин среднего времени восстановления T_b и средней наработки на отказ T_o .

Анализ результатов расчетов ПН различных систем и комплексов показывает, что расчётные значения коэффициентов готовности не менее величины **0,9994** могут быть получены для достаточно жестких, но выполнимых значений времени восстановления (задаваемых требованиями ТЗ) при наличии в комплекте

ЗИП всех основных (активных) элементов изделия и тренированности оперативного эксплуатирующего персонала по замене отказавшего оборудования. При этом снижение средней величины наработки на отказ T_0 , приводит к некоторому незначительному, но допустимому уменьшению вероятности безотказной работы и коэффициента готовности K_r системы в целом. Среднее же время восстановления T_v , особенно при отсутствии необходимого для замены элемента в комплекте ЗИП, увеличивается значительно выше допустимых пределов и для его сохранения в пределах заданного уровня необходимо существенно уменьшать время восстановления каждого i -го элемента. Методом перебора при расчётах можно получить оптимальные (квазиоптимальные) значения этих величин.

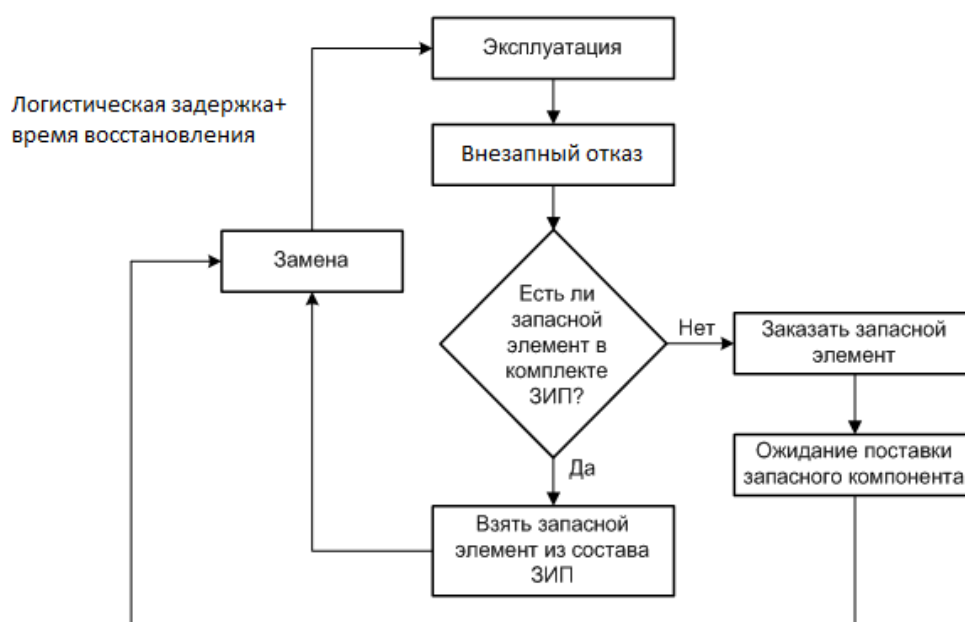
Как правило, среднее время восстановления работоспособности комплексов, аналогичных ССС ВРЛ и КРЛ, не превышает 30 минут при использовании ЗИП (за исключением отдельных элементов антенных систем, время восстановления которых может достигать нескольких часов).

В случае отсутствия в составе комплекта ЗИП элемента, необходимого для замены вышедшего из строя, время восстановления работоспособности изделия ССС с учётом логистической задержки доставки требуемого элемента $\Delta t_{\text{зип}}$ может значительно увеличиться, а значение вероятности безотказной работы, значит и коэффициента готовности, при этом существенно уменьшится.

Следовательно, оценки ПН изделий ССС целесообразно выполнять с использованием обобщенной расчётной математической модели, учитывающей как модель динамических процессов функционирования комплекса оборудования ССС ВРЛ и КРЛ, так и модели возникновения отказов и восстановления отказавших элементов путём замены из имеющихся запасов ЗИП с учётом логистической задержки, и позволяющей решить ещё одну важную задачу определения требуемых запасов ЗИП для обеспечения заданных значений показателей надёжности ССС ВРЛ и КРЛ.

В рассматриваемой обобщенной модели функционирования изделия ССС под логистической задержкой $\Delta t_{\text{зип}}$ понимается суммарное время ожидания, пока органы снабжения эксплуатирующей организации или завода-изготовителя доставят исправный элемент до места размещения комплекта ЗИП, либо ремонта отказавшего элемента при его отсутствии в составе ЗИП. В данном случае под временем восстановления T_v понимается время, в течение которого восстанавливается функционирование изделия ССС или время переключения с отказавшего на резервный элемент при автоматическом резервировании без учёта времени доставки исправного элемента.

Модель динамического процесса функционирования ССС ВРЛ и КРЛ, включая возникновение отказа и восстановление отказавшего элемента, представлена на рисунке.



Модель динамического процесса функционирования ССС ВРЛ и КРЛ

Поскольку статистика отказов запасных частей, находящихся в режиме ожидания, априорно неизвестна, при определении величины λ_{zi} учитывается, в основном, интенсивность замен из-за отказов в рабочем режиме изделия ССС без учёта других малозначащих факторов из-за незначительного их влияния (профилактические замены при проведении ТО; отказы при хранении в составе ЗИП, ошибочные замены в процессе поиска неисправностей и др.).

Как показывает практика [1-12], интенсивность отказов резервных элементов из состава комплекта ЗИП может быть принята равной от одной пятой до одной десятой интенсивности отказа активного элемента.

В идеале для безотказной работы произвольной системы необходимо, чтобы каждый её расчётный элемент работал безотказно. Так как отказы элементов ССС взаимно независимы, то коэффициент готовности системы K_g равен произведению коэффициентов готовности её элементов. Поэтому коэффициент готовности системы при последовательном соединении элементов всегда меньше, чем коэффициент готовности самого ненадёжного элемента, и его величина существенно возрастает при увеличении надёжности самого ненадёжного элемента.

Расчёт пополняемых запасов в комплекте ЗИП сводится к решению самостоятельной научной задачи оптимизации объёма запасов [1-5], обеспечивающих требуемый уровень показателя достаточности ЗИП. В этом случае K_g изделия ССС, определяется с учётом величины логистической задержки $\Delta t_{\text{зип}}$ согласно выражению (8), при минимальных суммарных затратах на запасные части. При этом минимальный состав комплекта ЗИП, определяющий начальный уровень запасов в комплекте ЗИП, вытекает из заданной для расчетов величины (пример) величины среднего времени восстановления изделия ССС не более 0,6 часа, которое гарантированно может быть обеспечено только при условии, что в состав комплекта ЗИП включаются все основные и наименее надёжные активные составные части изделия ССС (сменные блоки, платы, устройства и другие типовые элементы замены (ТЭЗ)), восстанавливаемые путём замены на исправный элемент из запасов комплекта ЗИП.

Поэтому для начального объёма запасов в комплекте ЗИП сначала определяются показатели достаточности ЗИП (с учётом значений показателей K_g и среднего времени восстановления T_v изделия), которые сравниваются с

требуемыми значениями в ТТЗ (ТЗ). В случае, если значения показателей K_g и T_v изделия ССС удовлетворяют требуемым значениям, расчёт объёма запасов в комплекте ЗИП можно считать завершённым. В противном случае необходимо применить резервирование наименее надёжных элементов и/или продолжить решение задачи оптимизации пополняемых запасов в комплекте ЗИП методом перебора вариантов состава ЗИП с учётом рекомендаций, изложенных в нормативном документе [12], до получения положительного результата при минимальной избыточности величины K_g изделия ССС.

Пополнение запасов в комплектах ЗИП возможно с использованием следующих трёх основных стратегий:

1. **Периодическое пополнение**, характеризующееся периодом планового пополнения запаса изделий ССС i -го типа;

2. **Периодическое пополнение с экстренными доставками**, характеризующееся периодом планового пополнения запаса i -го типа и временем экстренной доставки запасной части i -го типа изделий ССС;

3. **Непрерывное пополнение**, характеризующееся временем доставки (или ремонта) запасной части i -го типа изделий ССС.

Каждый отдельный запас объёмов изделий ССС в комплекте ЗИП может пополняться по своей отдельной стратегии, отличающейся как типом, так и значениями числовых параметров.

Обоснование и выбор стратегии пополнения запасов изделий ССС в комплекте ЗИП осуществляется с учётом назначения, решаемых задач и функциональной схемы изделия ССС. В частности, *стратегия периодического пополнения*, как правило, применяется для запасов невосстанавливаемых частей с относительно малыми интенсивностями спроса на них на удаленных и (или) малодоступных объектах.

Для ССС ВРЛ и КРЛ целесообразно применить *стратегию непрерывного пополнения* запасов восстанавливаемых составных частей, которые обмениваются на исправные в органах снабжения или в комплектах ЗИП более высокого уровня, либо восстанавливаются в ремонтном органе и возвращаются в комплект ЗИП.

В отдельных случаях для элементов дорогостоящих устройств с учётом возможностей ресурсного обеспечения (по решению Заказчика и предложениям эксплуатирующей организации) может применяться *стратегия периодического пополнения с экстренными доставками*

при условии приемлемого времени экстренной доставки запасной части изделия ССС.

В существующих изделиях ССС, имеющих сложную структуру, к которым можно отнести отдельные системы ССС ВРЛ и КРЛ, например, отдельную ССС или одну из её подсистем, суммарный поток замен составных частей i -го типа в общем случае не совпадает с потоком отказов изделия в целом, поскольку замены отказавших составных частей в резервных устройствах не приводят к отказу изделия.

Поэтому при оценке (или расчётах) запасов объёмов в комплекте ЗИП именно для таких систем, к которым можно отнести и ССС ВРЛ, и КРЛ, целесообразно задавать обобщенный параметр – коэффициент готовности K_r изделия в целом, определяемый выражением (8) с учётом величины логистической задержки доставки элемента, необходимого для восстановления работоспособности изделия ССС.

В зависимости от принятой стратегии пополнения объёмов запасов в комплекте ЗИП, производителей составных частей изделия ССС и других факторов логистическое время доставки требуемого элемента может принимать различные значения, например, 1 месяц – 732 часа, 2 месяца – 1464 часов, 3 месяца – 2195 часов и более (для элементов зарубежных производителей). При увеличении логистического времени доставки запасных элементов среднее время восстановления T_v будет увеличиваться, а коэффициент готовности изделия K_r , соответственно, будет уменьшаться. При этом одновременно увеличивается вероятность отказа двух и более элементов изделия ССС в течение времени восстановления.

При проведении расчётов показателей достаточности объёмов запасов в комплекте ЗИП не учитывается оборудование контрольных и служебных трактов, отказ которых не приводит к отказу изделия ССС, а также контрольно-измерительные приборы, инструменты, принадлежности и материалы, крепежные изделия, монтажные провода и другие пассивные элементы с относительно малыми интенсивностями спроса (замен). Потребность в этих элементах в составе ЗИП определяется эксплуатирующей организацией, исходя из назначения и условий эксплуатации оборудования изделия ССС с учётом опыта эксплуатации его аналогов или прототипов.

Заключение

В статье представлен разработанный и адаптированный под условия практического применения методический аппарат оценки показателей надёжности земных станций спутниковой связи, который представляет собой иерархическую структуру расчёта показателей надёжности от отдельных компонент на уровне узлов и модулей до функционально законченных структурных блоков и составных частей комплекса ССС.

При этом данный подход является универсальным, инвариантным к исходным данным и учитывает все основные факторы, влияющие на итоговое значение показателя надёжности ССС, включая среднюю наработку на отказ, среднее время восстановления, коэффициент готовности изделия к выполнению поставленных задач.

Следующая статья будет являться логическим продолжением данной статьи и будет направлена на представление и анализ результатов математического моделирования и расчётов показателя надёжности проектируемых станций спутниковой связи.

Литература

1. Куренков В.И. Методы обеспечения надёжности и экспериментальная отработка ракетно-космической техники: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2012. 258 с.
2. Шубин Р.А. Надёжность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 80 с.
3. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надёжность машин. М.: Высшая школа, 1988. 240 с.
4. Фортуненко А.Д. Основы технического проектирования систем связи через ИСЗ. М.: Связь, 1972. 331 с.
5. Спутниковая связь и вещание: справочник / В.А. Бартев, Г.В. Болотов, В.Л. Быков и др. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1997. 528 с.
6. Упрощенный алгоритм построения вероятностной модели оценки степени рисков инновационных проектов / В.И. Великоиваненко, Н.В. Гусаков, Д.Г. Пантенков, В.М. Соколов // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 81-89.
7. Система спутниковой связи с последовательным зональным обслуживанием / В.И. Великоиваненко, Н.В. Гусаков, П.В. Донченко, А.А. Ломакин, Д.Г. Пантенков, В.М. Соколов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 2 (75). С. 48-56.
8. Бернард Склар. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Второе издание, исправленное. М.: ИД «Вильямс», 2003. 1106 с.
9. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: учеб. пособие. Таганрог: ТРТУ, 1997. Ч. 1. 95 с.
10. Системы спутниковой связи с эллиптическими орбитами, разнесением ветвей и адаптивной обработкой /

Е.Ф. Камнев, В.Ю. Бобков и др. М.: Глобсатком, 2009. 724 с.

11. Руководство по авиационной электросвязи (РС ГА-99), утвержденное приказом ФСВТ России от 15.07.1999 г. № 14.

12. Правила применения антенн и фидерных устройств, утвержденные приказом Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации от «23» ноября 2006 г. № 153.

13. Правила применения земных станций спутниковой связи и вещания единой сети электросвязи Российской Федерации. Ч. I. Правила применения земных станций спутниковой связи, работающих через искусственные спутники Земли на геостационарной орбите, утвержденные приказом Министерства информационных технологий и связи РФ от «22» августа 2007 г. № 99.

14. Распоряжение Минтранса РФ от 22.08.2001 № НА-323-р "О допуске к эксплуатации в гражданской авиации авиационных станций спутниковой связи стандарта Inmarsat Mini-M AERO".

15. Бузов А.Л., Букашкин С.А. Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов. М.: Радиотехника, 2017. 448 с.

16. Пантенков Д.Г. Методический подход к интегральной оценке эффективности применения авиационных комплексов с БПЛА. Ч. 1. Методики оценки эффективности решения задач радиосвязи и дистанционного мониторинга // Труды учебных заведений связи. 2020. Т. 6. № 2. С. 60-78.

17. Комплексная методика оценки экономической целесообразности проектирования космических аппаратов в целях решения разнородных технико-экономических задач / В.И. Великоиваненко, Д.Д. Кутоманова, Д.Г. Пантенков, О.П. Скоробогатов, Г.А. Тихов // Космонавтика и ракетостроение. 2020. №3 (114). С. 38-48.

18. Д.Г. Пантенков. Технические характеристики бортовых ретрансляторов космических аппаратов для обеспечения загоризонтной радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 5 (9). С. 58-74.

19. Пантенков Д.Г. Методика структурно-параметрической оптимизации целевой нагрузки космического аппарата в интересах решения разнородных частных целевых задач // Тезисы докладов XX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ОАО «РКК «Энергия». Королёв, 2014. С. 290-291.

Поступила 11.05.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

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

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

MATHEMATICAL APPARATUS FOR DETERMINING THE RELIABILITY OF PROJECTED SATELLITE COMMUNICATION STATIONS ON MOBILE OBJECTS

D.G. Pantenkov¹, V.P. Litvinenko²

¹“Kronstadt”, Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: currently, satellite communication systems are widely used, allowing information and command exchange between different remote subscribers, both fixed and mobile. Some satellite communication system necessarily consists of a terrestrial satellite communication station and a plurality of user terminals of various origins (aviation, marine, etc.) and versions (wearable, carried, installed on mobile facilities, etc.). At the same time, the quality of the developed technical systems and devices often plays a particularly important role, which directly affects the effectiveness of solving the assigned target tasks of the facilities that include this equipment. In this article, the quality of equipment is understood as its reliability during operation, which is quantifiable, depending on a number of factors. We present the main approaches to solving the problem, we give the main requirements for the reliability of the SCS, and we present the methodological apparatus for determining reliability, taking into account the specifics of the problem being solved. The purpose of the article is to develop a scientific and methodological apparatus for assessing the reliability indicators of the designed satellite communication stations. The methodological apparatus takes into account the main functionally related reliability indicators - mean time between failures, average recovery time, and article readiness factor. The methodological provisions of the calculations for the formation of the reliability assurance program are based on the sequential determination of the composition and structural reliability scheme of the product, the mathematical model for each element and the product as a whole, which determines the main calculation relationships for determining the reliability assurance program, take into account the main technical limitations. Evaluation of reliability indicators of components (elements, devices) of the product is carried out according to the hierarchy of the structural reliability scheme "bottom-up," therefore, the values of reliability indicators of components of the lower level are initial data for calculating the values of reliability indicators of components of the higher level. The developed technique is universal, invariant to input parameters and can be applied to other systems (stations) from the radio link of satellite radio communication. The practical significance of the article is the possibility of obtaining quantitative estimates of reliability indicators of satellite stations even at the stage of conducting an advance project when justifying the design parameters of the equipment or forming tactical and technical tasks for development work

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

References

1. Kurenkov V.I. "Methods of ensuring reliability and experimental development of rocket and space technology" ("Metody obespecheniya nadozhnosti i eksperimental'naya otrabotka raketnokosmicheskoy tekhniki"), textbook, Samara State Aerospace University named after S.P. Korolev, 2012, 258 p.
2. Shubin R.A. "Reliability of technical systems and manufactured risk" ("Nadozhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogenny risk"), textbook, Tambov, Publishing House of TSTU, 2012, 80 p.
3. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z. "Reliability of machines" ("Nadozhnost' mashin"), Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 240 p.
4. Fortushenko A.D. "Fundamentals of technical design of communication systems via ISS" ("Osnovy tekhnicheskogo proektirovaniya sistem svyazi cherez ISZ"), Moscow, Svyaz', 1972.
5. Bartenev V.A., Bolotov G.V., Bykov V.L. et al. "Satellite communications and broadcasting" ("Sputnikovaya svyaz' i veshchanie"), reference book, Moscow, Radio i svyaz', 1997, 528 p.
6. Velikoivanenko V.I., Gusakov N.V., Pantenkov D.G., Sokolov V.M. "Simplified algorithm for constructing a probability model for assessing the degree of risk of innovative projects", *Space Equipment and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, 2014, no. 3(6), pp. 81-89.
7. Velikoivanenko V.I., Gusakov N.V., Donchenko P.V., Lomakin A.A., Pantenkov D.G., Sokolov V.M. "Satellite communication system with serial zone maintenance", *Cosmonautics and Rocket Engineering (Kosmonavtika i raketostroenie)*, 2014, no. 2 (75), pp. 48-56.
8. Sklar B. "Digital communications. Theoretical foundations and practical application" ("Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye"), Moscow, Williams, 2003, 1106 p.
9. Dyatlov A.P. "Satellite communication systems with mobile objects" ("Sistemy sputnikovoy svyazi s podvizhnymi ob"ektami"), textbook, Taganrog, TRTU, 1997, 95 p.
10. Kamnev E.F., Bobkov V.Yu. et al. "Satellite communication systems with elliptical orbits, branch separation and adaptive processing" ("Sistemy sputnikovoy svyazi s ellipticheskimi orbitami, razneseniem vetvev i adaptivnoy obrabotkoy"), Moscow, Globosatkom, 2009, 724 p.
11. Manual on Aviation Telecommunication (RS GA-99), approved by Order of the Federal Security Service of Russia dated 15.07.1999, no. 14.
12. Rules for the use of antennas and feeder devices, approved by Order of the Ministry of Information Technologies and Communications of the Russian Federation dated November 23, 2006, no. 153.
13. Rules of application of terrestrial stations of satellite communication and broadcasting of the unified telecommunication network of the Russian Federation. Part I. Rules for the use of Earth satellite communication stations operating through artificial Earth satellites in geostationary orbit, approved by order of the Ministry of Information Technologies and Communications of the Russian Federation dated August 22, 2007, no. 99.
14. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 22.08.2001 no. NA-323-r "On admission to operation in civil aviation of Inmarsat Mini-M AERO standard satellite communication stations".
15. Buzov A.L., Bukashkin S.A. "Special radio communication. Development and modernization of equipment and facilities" ("Razvitiye i modernizatsiya oborudovaniya i ob"ektov"), Moscow, Radiotekhnika, 2017, 448 p.
16. Pantenkov D.G. "Methodological approach to integral evaluation of the effectiveness of using aircraft systems with UAVs. Part 1. Methods for assessing the effectiveness of solving problems of radio communication and remote monitoring", *Works of Educational Institutions of Communication (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2020, vol. 6, no 2, pp. 60-78.
17. Velikoivanenko V.I., Kutomanova D.D., Pantenkov D.G., Skorobogatov O.P., Tikhov G.A. "Comprehensive methodology for assessing the economic feasibility of designing spacecraft in order to solve heterogeneous technical and economic problems", *Cosmonautics and Rocket Engineering (Kosmonavtika i raketostroenie)*, 2020, no. 3 (114), pp. 38-48.
18. Pantenkov D.G. "Technical Specifications of on-board spacecraft repeaters for off-horizon radio communication with unmanned aerial vehicles", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2020, vol. 84, no. 5 (9), pp. 58-74.
19. Pantenkov D.G. "Methodology of structural-parametric optimization of the target load of the spacecraft in the interests of solving heterogeneous private target problems", *Abstracts of reports of the XX Scientific and Technical Conf. of Young Scientists and Specialists of RSC Energia OJSC (Tezisy dokladov XX nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov OAO «RKK «Energiya»)*, Korolev, 2014, pp. 290-291.

Submitted 11.05.2021; revised 21.06.2021

Information about the authors

Dmitriy G. Pantenkov, Cand. Sc. (Technical), Deputy chief designer of radio communication systems, Kronstadt (18 prospect Andropova, Moscow 115432, Russia), tel. +7(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru
Vladimir P. Litvinenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗОГНУТЫХ МИМО АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

И.А. Баранников, К.А. Бердников, С.И. Деревянкин, Е.А. Ищенко, А.И. Сукачев,
С.М. Фёдоров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается гибкая МИМО антенная решетка для сетей пятого поколения, которая способна обеспечить работу в миллиметровом диапазоне волн (mmWave). Разработанная МИМО антенная решетка, способная обеспечить прием и передачу сигналов в диапазоне n258 (24,25-27,5 ГГц) и n261 (27,5-28,35 ГГц). При исследовании было определено влияние изгиба антенного элемента на характеристики матрицы рассеивания (S-параметры), диаграммы направленности, коэффициента полезного действия. При применении изогнутой МИМО антенной решетки было обнаружено, что при малом радиусе изгиба происходит улучшение коэффициента корреляции огибающей, при этом эффективность сложения в МИМО системе не изменяется при формировании изгиба. При исследовании рассматривались изгибы радиусом 100 мм, 250 мм, 500 мм. Применение изогнутых антенных решеток позволяет установить большее число базовых станций с антеннами миллиметрового диапазона волн, что позволяет обеспечить наилучшее покрытие 5G mmWave, так как именно в этом диапазоне волн достигаются основные характеристики сетей пятого поколения: малая задержка при передаче сигналов (1 мс), высокая скорость передачи данных (1 Гбит/с). Развитие сетей пятого поколения открывает новые возможности для каждого пользователя не только в области потребления информации, но и в технологиях Интернета вещей

Ключевые слова: МИМО, 5G mmWave, изогнутая антенна

Введение

Сети пятого поколения позволяют достичь новых показателей в качестве получения информации, так как обладают высокой скоростью передачи, малой задержкой. Для реализации требуемых значений скоростей передачи и приема (более 1 Гбит/с каждому подключенному) применяется несколько технологий:

- 1) МИМО технология, на основе которой формируются антенные решетки, обеспечивающие многоканальную передачу информации;
- 2) высокая спектральная эффективность;
- 3) применение антенн миллиметрового диапазона (mmWave).

Для обеспечения повсеместного доступа к сетям пятого поколения миллиметрового диапазона требуется устанавливать большое количество антенн. В работе авторов [1] исследуется возможность построения антенной решетки миллиметрового диапазона (mmWave). Однако для сетей пятого поколения очень важно, чтобы при внедрении технологии изогнутых МИМО антенных решеток миллиметрового диапазона не происходило серьезных искажений диаграмм направленности, основных параметров МИМО системы (коэффициента корреляции,

эффективности сложения, коэффициента усиления при разнесенном режиме).

Применение изогнутых антенных решеток позволяет найти новые места установок антенн в городах.

Основные параметры МИМО антенных решеток

При описании работы МИМО антенной решетки очень важно обеспечить малую корреляцию каналов в режиме приема и передачи информации. Для определения данного параметра применяется коэффициент корреляции огибающей:

$$ECC = \frac{|\iint \vec{F}_1(\theta, \varphi) \cdot \vec{F}_2^*(\theta, \varphi) d\Omega|^2}{\iint |\vec{F}_1(\theta, \varphi)|^2 d\Omega \cdot \iint |\vec{F}_2(\theta, \varphi)|^2 d\Omega}, \quad (1)$$

где ECC – коэффициент корреляции МИМО;

$\vec{F}_n(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности антенны;

* – обозначает взятие комплексно-сопряженного числа.

Другим методом расчета данного параметра является выражение на основе S-параметров антенной решетки [2], однако данный расчет возможен только в случаях, когда КПД антенн выше 90%, что практически недостижимо для планарной технологии изготовления антенн (как правило КПД в таких антеннах около 80%).

На основе ECC рассчитывается коэффициент усиления при разнесенном режиме:

$$DG = 10 \cdot \sqrt{1 - ECC} \quad (2)$$

где DG – коэффициент усиления при разнесенном режиме;

ECC – коэффициент корреляции огибающей, может быть рассчитан в соответствии с (1).

После приема сигналов в MIMO режиме требуется произвести их сложение [3], данная характеристика определяется в соответствии с:

$$ME = \sqrt{\eta_1 \eta_2 (1 - ECC)} \quad (3)$$

Как было исследовано в работе [4], при расстоянии между антенными элементами более $0,2\lambda$ обеспечивается стабильное функционирование антенной решетки в mmWave диапазоне.

Выбор типа излучателя

В качестве исследуемого излучателя была выбрана двухслойная патч-антенна с микрополосковой линией питания [5]. Для построения антенн, работающих в миллиметровых диапазонах, особо важными являются диоптрические подложки. Для реализации антенн, работающих в диапазонах частот сверх 20 ГГц, возможно использование высокостабильных диэлектриков или сложных диэлектрических структур [6].

Схематические изображения рассматриваемой антенны приводятся на рис. 1.

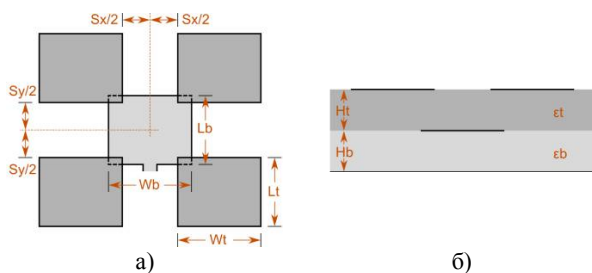


Рис. 1. Модель исследуемой антенны

В качестве материала двухслойного диэлектрика выступали 2 слоя RO4003С толщиной 305 мкм, обладающие диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 3,38$. Размеры одного антенного элемента приводятся в таблице.

Размеры патч-антенны

Wb, мм	Lb, мм	Wt, мм	Lt, мм	Sx, мм	Sy, мм	Ht, Hb, мкм
2,091	2,613	1,986	2,483	1,673	2,091	305

Из рассчитанных антенных элементов была сформирована MIMO антенная решетка 4x4, которая должна обеспечивать функционирование в частотном диапазоне 24,25-24,65 ГГц, который соответствует mmWave диапазону 5G, выделенному для ПАО «МТС».

Исследование влияния изгиба MIMO антенной решетки на характеристики

Для определения рабочего диапазона антенной решетки произведем моделирование S-параметров антенного элемента без изгиба (рис. 2).

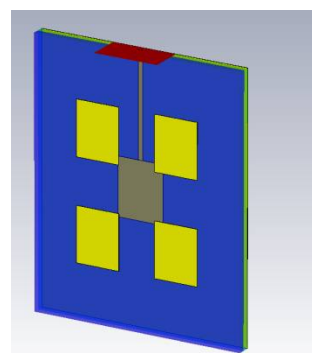


Рис. 2. Антенный элемент

Полученный в процессе моделирования график S_{11} -параметров приводится на рис. 3, на графике отмечены диапазоны mmWave 5G, входящие в диапазон, когда значение графика менее -10 дБ (КСВН=2).

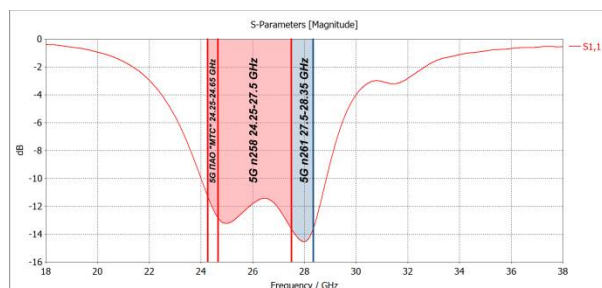


Рис. 3. S_{11} -параметры антенного элемента

В процессе исследования производилось исследование 4 MIMO антенных решеток:

1) плоская антенная решетка без изгиба (рис. 4а);

- 2) антенная решетка с изгибом $R=100$ мм (рис. 4б);
- 3) антенная решетка с изгибом $R=250$ мм (рис. 4в);
- 4) антенная решетка с изгибом $R=500$ мм (рис. 4г).

Такие радиусы изгиба позволяют сформировать несколько видов антенных решеток, которые возможно установить в базовых станциях, которые для реализации повсеместного покрытия сетями 5G миллиметрового диапазона требуют частого размещения.

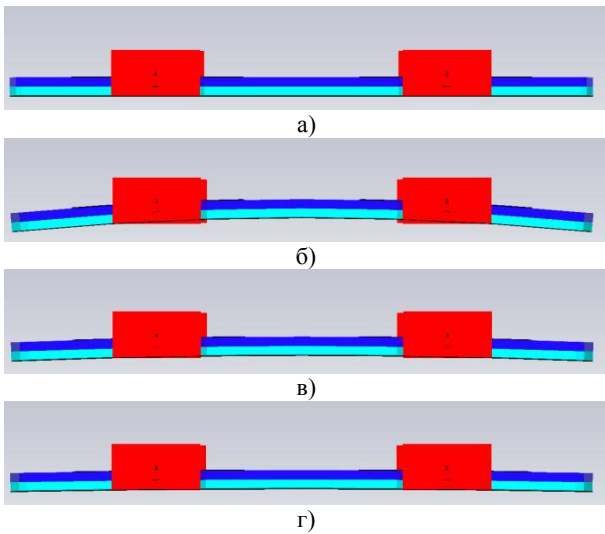


Рис. 4. Рассматриваемые изгибы антенных решеток

Произведем сравнение полученных ММО антенных решеток по ряду основных параметров:

- 1) S_{11} -параметры антенного элемента в составе решетки (рис. 5);
- 2) КПД антенного элемента (рис. 6);
- 3) характеристики диаграммы направленности на частоте $f=24,25$ ГГц (рис. 7).

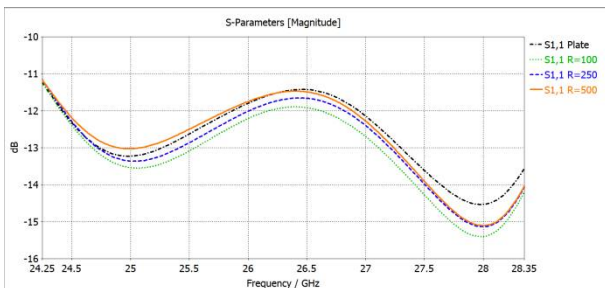


Рис. 5. S_{11} -параметры антенного элемента

Как видно, по полученным графикам при увеличении крутизны изгиба (уменьшение радиуса) S_{11} -параметры становятся ниже, что должно позитивно сказаться на эффективности

антенного элемента, однако изменения незначительны, что позволяет предполагать отсутствие серьезных искажений диаграмм направленности.

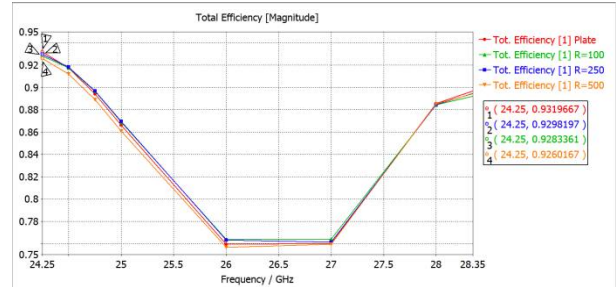


Рис. 6. КПД антенного элемента

Полученные зависимости показывают, что внедрение изгиба в антенную систему не приводит к серьезному изменению КПД.

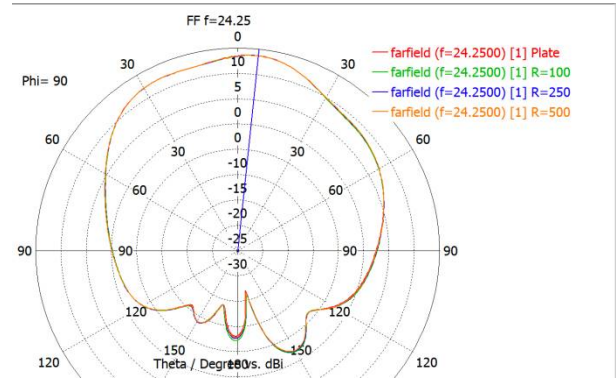


Рис. 7. Диаграмма направленности антенного элемента на частоте $f=24,25$ ГГц ($\varphi = 90^\circ$)

Полученные диаграммы направленности показывают, что отсутствует серьезное искажение диаграмм направленности, так наибольший КНД наблюдался при отсутствии изгиба и составлял 8,69 дБи, наименьший составил 8,65 дБи при изгибе с $R=100$ мм; направление излучения во всех случаях составляет 6° . Уровень боковых лепестков при плоской антенной решетке составил -16 дБ, наибольшее значение наблюдалось при $R=100$ мм и составило -15,7 дБ.

Наиболее важными параметрами для ММО антенной решетки являются коэффициенты корреляции и эффективности сложения, которые определяют эффективность работы системы. Так как антенная решетка предназначена для работы в режиме 4×4 требуется рассчитать 3 коэффициента корреляции для каждого антенного элемента, однако ввиду симметричности задачи коэффициент корреляции для каждой комбинации антенн будет соответ-

ствовать определенному для первого с поправкой на взаимное месторасположение антенн. Расположение антенных элементов при определении коэффициента приведено на рис. 8.

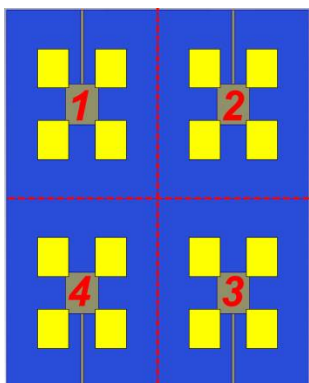


Рис. 8. Расположение антенн при определении ECC

Полученные коэффициенты корреляции для 1 и 2 антенного элемента приведены на рис. 9; 1 и 3 – рис. 10; 1 и 4 – рис. 11.

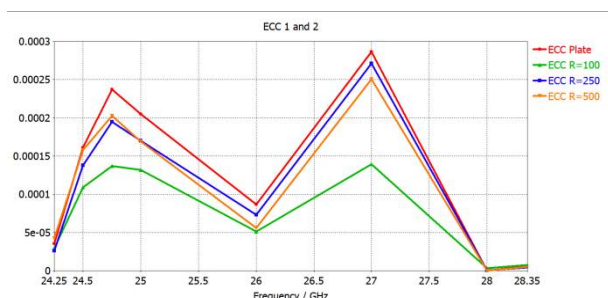


Рис. 9. ECC для 1 и 2 антенных элементов

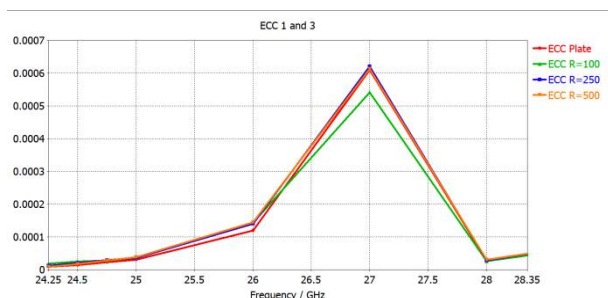


Рис. 10. ECC для 1 и 3 антенных элементов

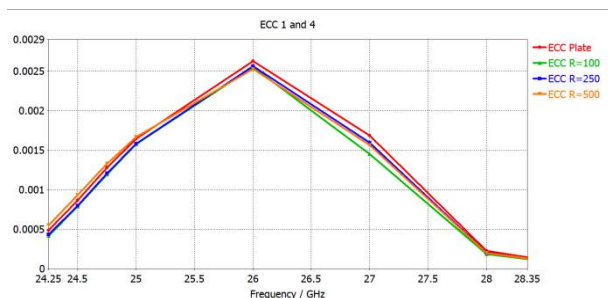


Рис. 11. ECC для 1 и 4 антенных элементов

Как видно по полученным результатам, наличие изгиба позволяет снизить коэффициент корреляции, что позитивно сказывается на характеристиках работы ММО антенной решетки. Наименьший коэффициент корреляции наблюдается при радиусе изгиба равном 100 мм, наибольший при отсутствии изгиба. Наиболее коррелируемы между собой антенные элементы, которые расположены друг напротив друга (1 и 4), что вызвано особенностями диаграмм направленности.

Произведем аналогичное исследование для эффективности сложения в ММО антенной решетке. Полученные коэффициенты МЕ для 1 и 2 антенного элемента приведены на рис. 12; 1 и 3 – рис. 13; 1 и 4 – рис. 14.

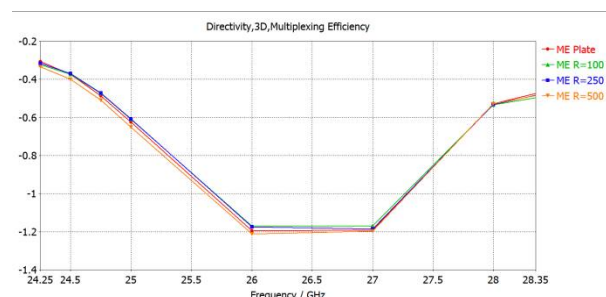


Рис. 12. МЕ для 1 и 2 антенных элементов

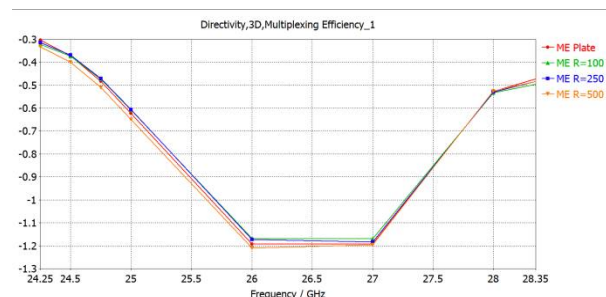


Рис. 13. МЕ для 1 и 3 антенных элементов

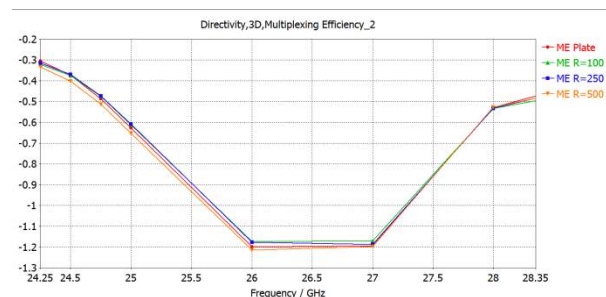


Рис. 14. МЕ для 1 и 4 антенных элементов

Полученные зависимости показывают, что изменение эффективности сложения в зависимости от изгиба ММО антенной решетки невелико, что показывает возможность примене-

ния изогнутых антенн, так как их основные характеристики изменяются не сильно относительно изначальных.

Заключение

В процессе исследования изучались изогнутые ММО антенные решетки для 5G mmWave связи. Полученные зависимости показывают, что применение изогнутых антенн не приводит к серьезным изменениям характеристик антенн, что открывает новые возможности при разработке антенн для частот миллиметрового диапазона, так как для обеспечения широкого покрытия требуется установка большого числа базовых станций с такими антеннами.

Литература

1. Conformal Antenna Array for Millimeter-Wave Communications: Performance Evaluation / V. Semkin, A. Bisognin, M. Kygö, V.-M. Kolmonen, C. Luxery, F. Ferrero, F.

Devillers, A.V. Räisänen // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2017. V. 9. № 1. pp. 241-247.

2. Blanch S., Romeu J., Corbella I. Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description // Electronics letters. 2003. V. 39. № 9. pp. 705-707.

3. Tian R., Lau B.K., Ying Z. Multiplexing Efficiency of MIMO Antennas // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2011. V. 10. pp. 183-186.

4. Исследование влияния расстояния между антеннами в ММО антенной решетке для сетей пятого поколения / С.А. Антипов, Е.А. Ищенко, В.Н. Кострова, К.А. Разинкин, Д.А. Стежкин, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 4. С. 91-95.

5. Legay H., Shafai L. New Stacked Microstrip Antenna with Large Bandwidth and High Gain // IEE Proc. Microwave, Antennas and Propagation. 1994. V. 141. № 3. pp. 199-204.

6. Синтез высокочастотных диэлектрических структур с контролируемой диэлектрической проницаемостью методом трехмерной печати / А.М. Бобрешов, П.А. Кретов, М.П. Ряполов, Е.А. Сбродов, К.В. Смусева, Г.К. Усков // Радиолокация, Навигация, Связь. 2019. Т. 5. С. 54-60.

Поступила 14.02.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

Баранников Илья Андреевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

Бердников Кирилл Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru

Деревянкин Сергей Игоревич - студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: derevyankin_sergej@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8883-8446>

Ищенко Евгений Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Сукачев Александр Игоревич - старший преподаватель 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: mag.dip@yandex.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

APPLYING CONFORMAL MIMO ANTENNA ARRAYS FOR FIFTH GENERATION NETWORKS

I.A. Barannikov, K.A. Berdnikov, S.I. Derevyankin, E.A. Ishchenko, A.I. Sukachev, S.M. Fyedorov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses a flexible MIMO antenna array for fifth generation networks, which is capable of providing operation in the millimeter wave (mmWave). The developed MIMO antenna array is capable of providing reception and transmission of signals in the n258 (24.25-27.5 GHz) and n261 (27.5-28.35 GHz) ranges. In the study, we determined the influence of the bending of the antenna element on the characteristics of the scattering matrix (S-parameters), the directivity diagram, and the efficiency. When using a curved MIMO antenna array, we found that at a small bend radius, an improvement in the envelope correlation coefficient occurs, while the addition efficiency in a MIMO system does not change during bending formation. The study considered bends with a radius of 100 mm, 250 mm, 500 mm. The use of curved antenna arrays allows the installation of a larger number of base stations with antennas of the millimeter wavelength range, which allows one to pro-

vide the best 5G mmWave coverage, since it is in this wavelength range that the main characteristics of fifth generation networks are achieved: low signal transmission delay (1 ms), high data transfer rate (1 Gbps). The development of fifth generation networks opens new opportunities for each user, not only in the field of information consumption but also in the technologies of the Internet of Things

Key words: MIMO, 5G mmWave, conformal antenna

References

1. Semkin V., Bisognin A., Kyrö M., Kolmonen V.-M., Luxery C., Ferrero F., Devillers F., Räisänen A.V. “Conformal antenna array for millimeter-wave communications: performance evaluation”, *Int. J. of Microwave and Wireless Technologies*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 241-247.
2. Blanch S., Romeu J., Corbella I. “Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description”, *Electronics Letters*, 2003, vol. 39, no. 9, pp. 705-707.
3. Tian R., Lau B.K., Ying Z. “Multiplexing efficiency of MIMO antennas”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, vol. 10, pp. 183-186.
4. Antipov S.A., Ishchenko E.A., Kostrova V.N., Razinkin K.A., Stezhkin D.A., Fedorov S.M. “Investigation of the effect of the distance between antennas in a MIMO antenna array for fifth generation networks”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 4, pp 91-95.
5. Legay H., Shafai L. “New stacked microstrip antenna with large bandwidth and high gain”, *IEE Proc. Microwave, Antennas and Propagation*, 1994, vol. 141, no. 3, pp. 199-204.
6. Bobreshov A.M., Kretov P.A., Ryapolov M.P., Sbrodov E.A., Smuseva K.V., Uskov G.K. “Synthesis of high-frequency dielectric structures with controlled dielectric permittivity using 3d printing”, *RLNC*2019*, 2019, vol. 5, pp. 54-60.

Submitted 14.02.2021; revised 21.06.2021

Information about the authors

Il'ya A. Barannikov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com

Kirill A. Berdnikov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru

Sergey I. Derevyankin, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: derevyankin_sergej@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8883-8446>

Evgeniy A. Ishchenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Aleksandr I. Sukachev, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: mag.dip@yandex.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>

ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТОКА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ КЛАССА D С КОММУТАЦИЕЙ ТОКА

А.В. Шуваев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются основные характеристики усилителя мощности класса D с коммутацией тока (CSCD). Приводится доказательство того, что теоретическая максимальная эффективность слива, которая может быть достигнута при переключении тока усилителя мощности класса D, составляет 100%, при некоторых идеализированных предположениях, а именно: мгновенное переключение транзисторов, нулевое напряжение колена и идеальный шунтирующий резонатор с бесконечной добротностью и нулевыми потерями. В работе при анализе реального усилителя мощности показано, что эффективность слива уменьшается с увеличением значения $V_{ds,sat}/V_{max}$. Из-за влияния напряжения на колене усилитель мощности CSCD имеет лучшую производительность, чем усилитель мощности с коммутацией напряжения. Делается вывод о том, что главное преимущество усилителя мощности CSCD заключается в том, что выходная емкость транзистора может быть шунтирована выходным резонатором, что приводит к переключению при нулевом напряжении. Однако по мере повышения частоты переключения при нулевом напряжении все труднее достичь с увеличением паразитной индуктивности, вносимой проводами. А также делается вывод о том, что выходной шунтирующий резонатор обеспечивает разомкнутую цепь на основной частоте и короткое замыкание на всех гармониках. Дроссельный индуктор обеспечивает разомкнутую цепь для всех гармоник четного порядка

Ключевые слова: теория усилителей, усилители на твердотельных (полупроводниковых) элементах, усилитель мощности класса D, эффективность стока

Введение

Усилители мощности класса D делятся на две топологии: усилитель мощности класса D с переключением напряжения (VSCD) и усилитель мощности класса D с коммутацией тока (CSCD). В этой статье будет рассмотрена только топология CSCD. На рис. 1 показана общепринятая схема усилителя мощности CSCD, где оба транзистора рассматриваются как идеальные переключатели с мгновенным включением и выключением.

Трансформатор также считается идеальным в том смысле, что он имеет коэффициент связи 1 ($n=2m$) с идеальным балансом величины/фазы и бесконечной полосой пропускания. Выходной шунтирующий резонатор (L_0, C_0) резонирует на основной частоте с высокой добротностью и обеспечивает короткое замыкание на всех частотах гармоник, так что только основная составляющая выходного тока трансформатора (I_T) может поступать на сопротивление нагрузки R_L . В течение первого полупериода ($0 \sim \pi$), когда верхний транзистор (T_1) включен, а нижний транзистор (T_2) выключен, постоянный ток (I_{DC}), подаваемый от источника питания через дроссель-индуктор, переключается на T_1 . В течение следующего

полупериода ($\pi \sim 2\pi$), T_2 включается и T_1 выключается, затем постоянный ток переключается на T_2 . Результирующие токи стока I_{DSP} и I_{DSM} выражены следующим образом:

$$I_{DSP} = \begin{cases} 0, & 0 \sim \pi \\ I_{DC}, & \pi \sim 2\pi' \end{cases} \quad (1)$$

$$I_{DSM} = \begin{cases} 0, & 0 \sim \pi \\ I_{DC}, & \pi \sim 2\pi' \end{cases} \quad (2)$$

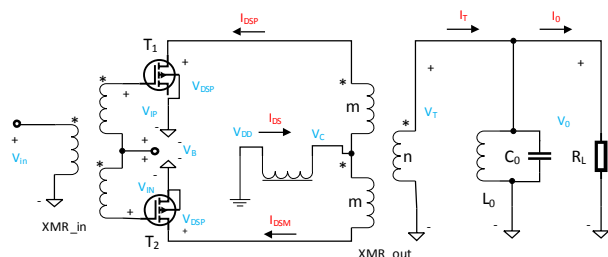


Рис. 1. Схема усилителя мощности класса D с коммутацией тока (CSCD)

Напряжения стока (V_{DSP} и V_{DSM}) являются полуволновыми выпрямленными версиями выходного напряжения с нулевым напряжением колена (V_{sat}). В течение первого полупериода ($0 \sim \pi$), когда верхний транзистор (T_1) включен, а нижний транзистор (T_2) выключен, напряжение стока верхнего транзистора V_{DSP} остается нулевым, если сопротивление включения транзисторов предполагается равным

нулю. С другой стороны, напряжение стока нижнего транзистора V_{DSM} имеет полусинусоидальную форму волны.

Во время другого полупериода ($\pi \sim 2\pi$), когда T_2 включен, а T_1 выключен, формы напряжения V_{DSP} и V_{DSM} меняются местами. После построения полного цикла сигнала на сбалансированных узлах трансформатора образуется синусоидальный сигнал. Напряжение стока можно представить в виде:

$$V_{DSP} = V_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1) + \sum_{n=1}^N V_{2n} \cos(2n \cdot \omega_0 t + \theta_{2n}), \quad (3)$$

$$V_{DSM} = V_1 \cos(\omega_0 t + \theta_1 + \pi) + \sum_{n=1}^N V_{2n} \cos(2n \cdot \omega_0 t + \theta_{2n} + 2n \cdot \pi). \quad (4)$$

Здесь величина основной части V_1 равна половине величины V_{DSP} или V_{DSM} , поскольку они являются полуволновыми выпрямленными синусоидальными волнами:

$$V_1 = \frac{V_{max}}{2}. \quad (5)$$

Эффективность слива, рассмотренного выше, усилителя мощности CSCD теперь можно рассчитать. Эффективность стока - это отношение общей выходной мощности к общей мощности постоянного тока ВЧ:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}}, \quad (6)$$

где выходная мощность (P_{out}) - это мощность, подаваемая на R_L , а мощность постоянного тока (P_{DC}) - мощность, обеспечиваемая источником питания. Выходная мощность рассчитывается как:

$$P_{out} = \frac{V_{max} \cdot I_1}{2}. \quad (7)$$

Общая мощность постоянного тока может быть рассчитана как:

$$P_{DC} = V_{DD} \cdot I_{DC}, \quad (8)$$

где I_{DC} - известная величина и V_{DD} равно среднему значению напряжения центрального отвода трансформатора (V_C):

$$V_{DD} = \frac{1}{T} \int_0^T V_C(t) dt = \frac{1}{2T} \int_0^T (V_{DSP} + V_{DSM}) dt = \frac{1}{\pi} \cdot V_{max}, \quad (9)$$

где T - период основной частоты. В (9) показано, что среднее значение полуволновой выпрямленной синусоидальной волны составляет $1/\pi$ от ее пикового значения (V_{max}). Наконец, можно получить эффективность слива:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}} = \frac{\frac{V_{max} \cdot I_1}{2}}{V_{DC} \cdot I_{DC}} = \frac{\frac{1}{2} V_{max} \cdot \frac{4 \cdot I_{DC}}{\pi \cdot 2}}{\frac{1}{\pi} V_{max} \cdot I_{DC}} = 100\%. \quad (10)$$

Теоретическая максимальная эффективность слива, которая может быть достигнута при переключении тока УМ класса D, составляет 100%, как указано в (10). Однако это требует некоторых идеализированных предположений, включая мгновенное переключение транзисторов, нулевое напряжение колена ($V_{ds,sat}$) и идеальный шунтирующий резонатор (L_0, C_0) с бесконечной добротностью и нулевыми потерями.

Анализ характеристик усилителя мощности CSCD

Анализ усилителя мощности CSCD предполагает нулевое напряжение колена ($V_{ds,sat}$), что, однако, невозможно реализовать в реальности. На самом деле, конечное напряжение колена в реальном усилителе мощности оказывает большое влияние на эффективность стока и всегда должно учитываться. Конечное напряжение колена в анализе усилителя мощности CSCD обычно включается как константа, как показано на рис. 2. Включение реального напряжения колена приводит к изменению выражения выходной мощности, мощности постоянного тока и эффективности стока:

$$P_{out} = \frac{(V_{max} - V_{ds,sat}) \cdot I_1}{2}, \quad (11)$$

$$V_{DD} = \frac{1}{\pi} \cdot (V_{max} - V_{ds,sat}) + V_{ds,sat}, \quad (12)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}} = \frac{\frac{1}{2} (V_{max} - V_{ds,sat}) \cdot \frac{4 \cdot I_{DC}}{\pi}}{\left(\frac{1}{\pi} (V_{max} - V_{ds,sat}) + V_{ds,sat}\right) \cdot I_{DC}} = \frac{\frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{V_{ds,sat}}{V_{max}}\right)}{\frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{V_{ds,sat}}{V_{max}}\right) + \frac{V_{ds,sat}}{V_{max}}} \cdot 100\%. \quad (13)$$

Анализ полученных результатов и выводы

Из выражения 13 видно, что эффективность слива уменьшается с увеличением значения $V_{ds,sat}/V_{max}$. Влияние напряжения колена в усилителе мощности VSCD обсуждается в работах [1, 2]. Из-за влияния напряжения на

колене усилитель мощности CSCD имеет лучшую производительность, чем усилитель мощности VSCD [2]. Преимущества CSCD в основном заключаются в том, что выходная емкость транзистора может быть шунтирована выходным резонатором, что приводит к переключению при нулевом напряжении [3]. Однако по мере повышения частоты переключение при нулевом напряжении все труднее достичь

с увеличением паразитной индуктивности, вносимой проводами.

Второе предположение в выводе об идеализированном усилителе мощности CSCD заключается в том, что выходной шунтирующий резонатор обеспечивает разомкнутую цепь на основной частоте и короткое замыкание на всех гармониках. Дроссельный индуктор обеспечивает разомкнутую цепь для всех гармоник четного порядка.

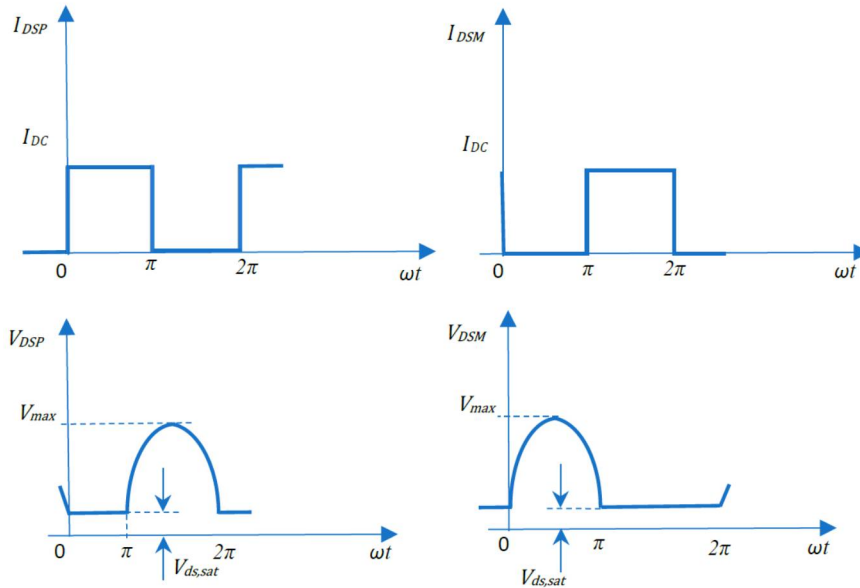


Рис. 2. Реальное напряжение колена в усилителе мощности CSCD

Однако такое требование к импедансу нагрузки непрактично и целесообразно только до гармоники 5-го порядка. В большинстве конструкций завершения до 3-го порядка достаточно, чтобы обеспечить требуемую эффективность в пределах нескольких дБ сжатия усиления [5]. Такая особенность усилителя мощности CSCD делает его обратным усилителем мощности класса F. Таким образом, эффективность стока в зависимости от подавления гармоник такая же, как и у обратного усилителя мощности класса F, как показано в таблице [4].

Последнее идеализированное предположение в выводе о работе усилителя мощности CSCD - это модель коммутатора для транзисторов. Предполагается, что транзистор включается мгновенно, так как обеспечивает нулевое сопротивление, когда входное напряжение затвора превышает пороговое напряжение, и выключается мгновенно, когда напряжение затвора становится ниже порогового напряжения. Такое предположение может быть допу-

стимо в однополосном усилителе мощности класса D, когда транзистор находится под достаточной перегрузкой (обычно она должна быть выше 3 дБ) [2]. Однако в параллельной схеме такое предположение становится неточным и нуждается в изменении.

Эффективность стока усилителя мощности CSCD в зависимости от подавления гармоник (n-гармоники тока стока, m-гармоники напряжения стока)

Гармоники	n=1	n=3	n=5	n=∞
m=1	0,5	0,563	0,586	0,637
m=2	0,667	0,75	0,781	0,849
m=4	0,711	0,8	0,833	0,905
m=∞	0,785	0,884	0,92	1,000

Литература

1. Cripps S. *RF power amplifiers for wireless communications*. Artech House, 2006.
2. Grebennikov A., Sokal N.O., and Franco M.J. *Switchmode RF and microwave power amplifiers*. Academic Press, 2012.

3. Beltran R.A. Class-F and inverse class-F power amplifier loading networks design based upon transmission zeros. Pp. 1-4.

4. Young Yun W., Youngoo Y., Bumman K. Analysis and experiments for highefficiency class-F and inverse class-F power amplifiers // IEEE Transactions on Mi-

crowave Theory and Techniques. 2006. Vol. 54. No. 5, Pp. 1969-1974.

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

Поступила 07.05.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

Шуваев Андрей Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kivr@vorstu.ru

QUESTIONS OF IMPROVING THE DRAIN EFFICIENCY OF A CLASS D POWER AMPLIFIER WITH CURRENT SWITCHING

A.V. Shuvaev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article discusses the main characteristics of a Class D current-switched power amplifier (CSCD). I give a proof that the theoretical maximum drain efficiency that can be achieved by switching the current of a class D power amplifier is 100%, under some idealized assumptions, namely: instantaneous switching of transistors, zero knee voltage, and an ideal shunt resonator with infinite Q-factor and zero loss. In this paper, when analyzing a real power amplifier, I demonstrate that the drain efficiency decreases as the value increases V_{ds}/V_{max} . As a result of changes in the knee voltage, the CSCD power amplifier has better performance than the voltage-switched power amplifier. I conclude that the main advantage of the CSCD the power amplifier is that the output capacitance of the semiconductor transistor can be grounded by the output resonator, which leads to switching at zero voltage. However, as the frequency increases, zero-voltage switching becomes more difficult to achieve with an increase in the parasitic inductance introduced by the wires. And I also conclude that the output resonator that grounds the signal provides an open circuit and a short circuit on all adjacent harmonics. The choke inductor provides an open circuit for all harmonics

Key words: amplifier theory, drain efficiency, solid-state (semiconductor) element amplifiers, class D power amplifier

References

1. Cripps S. "RF power amplifiers for wireless communications", Artech House, 2006.
2. Grebennikov A., Sokal N.O., Franco M.J. "Switchmode RF and microwave power amplifiers", Academic Press, 2012.
3. Beltran R.A. "Class-F and inverse class-F power amplifier loading networks design based upon transmission zeros", pp. 1-4.
4. Young Yun W., Youngoo Y., Bumman K. "Analysis and experiments for high efficiency class-F and inverse class-F power amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, vol. 54, no. 5, pp. 1969-1974.
5. Astakhov N.V., Bashkirov A.V., Zhurilova O.E., Makarov O.Yu. "Frequency-time analysis of nonstationary signals by methods of the wavelet transform and window Fourier transform", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 109-112.

Submitted 07.05.2021; revised 21.06.2021

Information about the author

Andrey V. Shuvaev, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА ЛИНЕЙНЫХ НАКОПЛЕННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

З.Х.М. Аль-Араджи

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: современные электронные блоки во время работы подвергаются различным видам нагрузок, таким как вибрация и удары. Вибрационная нагрузка, как одно из условий нагружения электронных узлов, стала очень важным ключевым фактором в оценке надежности современных электронных систем. Проблема здесь заключается в том, как быстро и точно выполнить анализ усталостной долговечности при вибрации. Вибрация приводит к повреждению печатной платы и нарушению целостности паяных соединений из-за возникновения повышенного напряжения. Рассматривается методика, которая отличается от традиционных использованием взаимосвязи между способами нагрузки и фиксации платы. Методики, предлагаемые ранее, не принимали во внимание тип установки компонентов на плату и ее влияние на распределение напряжения на поверхности. Показана взаимосвязь между механическим напряжением и способами фиксации платы. Оценка усталостной прочности печатной платы, которая поможет аналитику сделать относительно точное прогнозирование вызванной усталостной долговечности. Процесс моделирования средствами PTC Creo Parametric включает четыре граничных условия (закрепление) платы, с целью определения оптимального метода фиксации с наименьшим напряжением. Кроме того, определение усталостной долговечности с помощью математических уравнений до начала фиксации снижает затраты и время

Ключевые слова: печатная плата (ПП), вибрация, радиоэлектроника, конструкция, усталостная долговечность, PTC Creo Parametric, трехинтервальный метод

Введение

Печатная плата является основным конструктивным элементом всех электронных средств.

Ударные и вибрационные нагрузки, воздействующие на печатную плату, могут, если они достаточно значительны, привести к выходу из строя подключенных электронных компонентов. Это накладывает особые требования на электронное оборудование таких объектов, как корабли, самолеты, спутники, которое должно обладать высокой надежностью, так как выход из строя хотя бы одного из компонентов может привести к выходу из строя всего объекта [1].

Электронные блоки состоят из сборок печатных плат, которые являются основной частью электронных устройств.

Печатные платы испытывают различные тепловые и механические нагрузки в процессе производства и срока их службы, включая циклический изгиб, падение, вибрацию и т.д.

Повторение этих нагрузок в течение срока службы изделия может привести к появлению трещин в печатной плате и паяных соединени-

ях, что в конечном итоге может привести к отказам этих блоков. Таким образом, печатная плата должна быть сконструирована таким образом, чтобы выдерживать работу в суровых условиях. Сильные ударные нагрузки могут привести к высоким напряжениям изгиба и прогибу выводов компонентов, припаянных к печатной плате. Критерий высокой циклической усталости может быть применен для анализа режимов отказов компонентов на печатных платах и оценки ресурса систем с высокой надежностью.

Использованный в статье подход базируется на использовании электронного пакета САПР, с помощью которого определяется усталостная долговечность печатной платы с компонентами и без компонентов.

САПР PTC Creo Parametric - одно из наиболее часто используемых приложений для анализа с помощью метода конечных элементов. Моделирование механических характеристик узлов РЭС на ранних этапах проектирования сокращает время на разработку и тем самым приводит к повышению эффективности процесса создания новой аппаратуры. Точность инженерного анализа - одна из важнейших задач процесса моделирования [4],[11].

Дэйв С. Штейнберг [11] в своих работах указывает на ожидаемый срок службы про-

димой части печатной платы. Приведены эмпирические формулы для оценки пределов усталости для общего допустимого 3σ относительного смещения печатной платы для случая 20 миллионов циклов циклического напряжения. Подход Штейнберга предполагает, что из-за основного режима изгиба механической системы максимальное повреждение компонентов на плате вызывается изгибающим напряжением, которое испытывают выводы. Подход Штейнберга предоставляет практические эмпирические формулы для определения пределов усталости для частей электронных компонентов, установленных на печатных платах. Предполагается, что вибрация находится в установившемся состоянии с гауссовым распределением. Классические методы усталости используют величину механического напряжения как важную меру определения запаса прочности. Но подход Штейнберга работает как в приблизительном, так и в эмпирическом смысле, потому что напряжение изгиба пропорционально напряжению, которое в свою очередь пропорционально относительному смещению. Одним из недостатков является то, что граничные условия печатных плат не учитываются.

В этой статье используется метод случайной вибрации для расчета усталости, а также трехинтервальный метод, предложенный Штейнбергом, то есть структура реакции на напряжение по Мизесу подчиняется распределению Гаусса.

В табл. 1 приведены данные о времени моделирования в зависимости от величины нагрузки, полезные для ускорения расчетов при различных граничных условиях [6].

Таблица 1

Уровни механического напряжения фон Мизес и время расчета

Значение напряжения между $-1\sigma_i$ и $1\sigma_i$	Занимает 68,3% общего времени
Значение напряжения между $-2\sigma_i$ и $2\sigma_i$	Занимает 68,3% общего времени
Значение напряжения между $-3\sigma_i$ и $3\sigma_i$	Занимает 68,3% общего времени
Значение напряжения более $3\sigma_i$	в пределах 0,27% времени, поэтому мы предполагаем, что оно не вызывает никаких повреждений.

В соответствии с линейной теорией накопленных повреждений повреждение, вызванное

ni - циклов при условии нагрузки σ_i , выражается как:

$$D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_{i-1} + D_i \geq 1.$$

Известно, что доля поврежденности при любом уровне амплитуды напряжения цикла σ_1 прямо пропорциональна отношению числа циклов его действия к полному числу циклов [14-15], т.е.

$$D = \frac{ni}{Ni}. \quad (1)$$

Тогда

$$(D) = \sum_{i=1}^n \frac{ni}{Ni}, \quad (2)$$

где D – накопленное усталостное повреждение, ni – количество циклов нагружения при уровне напряжений σ_i ;

Ni – количество циклов нагружения до разрушения рассматриваемого элемента при уровне напряжений σ_i . [7].

При разрушении рассматриваемого элемента суммы $\sum ni/Ni$ в момент разрушения приблизятся к единице [8] [14].

$$D = 1$$

Время усталости конструкции при случайной вибрации T , фактическое количество циклов выражается как:

$$n_{1\sigma} = 0.683 v^+ T, \quad (3a)$$

$$n_{2\sigma} = 0.271 v^+ T, \quad (3b)$$

$$n_{3\sigma} = 0.043 v^+ T, \quad (3c)$$

где $n_{1\sigma}$, $n_{2\sigma}$, $n_{3\sigma}$ представляют количество циклов при уровне напряжения соответственно;

v^+ - это средняя статистическая частота напряжения фон Мизеса, которая определяется как [4]

$$V^+ = \frac{f_{max} - f_{min}}{2} \quad (4)$$

Подставляя (3) в (1), получаем формулу для расчета общей усталостной долговечности конструкции:

$$D = (0.683V^+T)/N_{1\sigma} + 0.27V^+T/N_{2\sigma} + 0.043V^+T/N_{3\sigma} \quad (5)$$

Приведенный выше расчет относится к конструкции из одного состава материала. Когда конструкция состоит из разных материалов, самое короткое время усталости материала - это срок службы конструкции.

Объект исследования

В этом исследовании печатная плата смоделирована как изотропная пластина с эквивалентными свойствами материала, такими как модуль Юнга (модуль упругости), коэффициент Пуассона и массовая плотность, как показано в табл. 2. Подробная информация о печатной плате: тонкий лист из алюминиевого сплава 6061 со сторонами 305 мм, 220 мм с толщиной 2 мм. В соответствии с [3] механические свойства алюминиевого сплава показаны в табл. 2.

Так как длина и ширина намного больше, чем толщина, модальные свойства анализируются методом оболочек. Печатная плата смоделирована в Solid Elements. Плата закреплена по четырем отверстиям по краям диаметром 10 миллиметров каждое.

Таблица 2

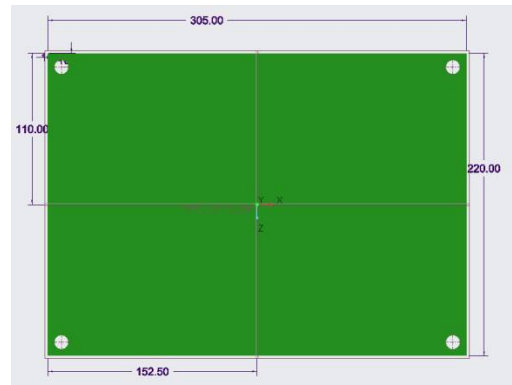
Подробная информация о печатной плате

Параметр	Значение
Размер печатной платы	305×220×2.1мм
Масса ППП	672 г
Модуль Юнга ППП	24 ГПа
Коэффициент Пуассона	0.33

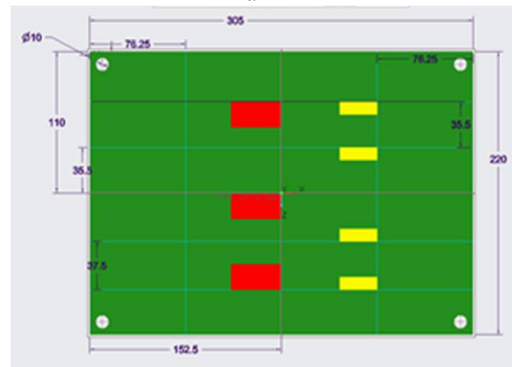
Методика исследования

Предлагается методика определения оптимальной конструкции, которая применима на ранних стадиях проектирования.

Печатная плата моделировалась двумя способами: в первом - без учета электронных компонентов и во втором - с учетом массы компонентов с использованием инструмента Solid «сосредоточенная масса», который заменяет электронные компоненты массой 100 г, как показано на рисунке (а, б).



а



б

Печатная плата электронного блока: а) без электронных компонентов; б) с использованием «сосредоточенной массы» в качестве массы компонентов

Тот факт, что в предыдущих исследованиях не учитывались различные методы установки и их влияние на усталостную долговечность, позволил избежать установки, которая вызывает значительные повреждения и является основной причиной отказа электронного устройства. Поэтому в нашем исследовании были протестированы четыре типа методов фиксации и выявлены наиболее близкие к оптимальным.

Использовано несколько типов закрепления печатной платы, данные о которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Граничные условия печатной платы

Способ закрепления	Типы граничных условий
Способ 1	Фиксируются две короткие стороны
Способ 2	Четыре фиксированных стороны
Способ 3	Фиксированные ограничения с координатами X (a / 4, b / 4), где a и b - размеры печатной платы. (152,35,5), (-152,35,5), (-152,35,5), (152,35,5).
Способ 4	Фиксируется знаком (+).(0, 35,5), (152,0), (0, -35,5) (-152, 0).

Моделирование

1. С целью прогнозирования для определения конструкции с наибольшим напряжением были проведены эксперименты, и полученные результаты представлены в табл. 5 и 6.

2. Способ 1 закрепления (табл. 4 и 5) является оптимальным, и максимальное напряжение фон Мизес составляет $4 \cdot 10^7$ Па, $2.9 \cdot 10^7$ Па в то время как худшим, которого следует избегать, являются пределы положе-

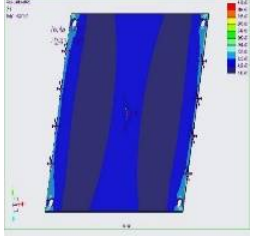
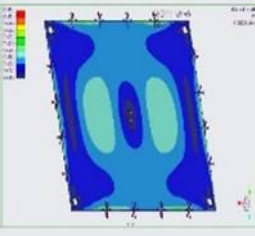
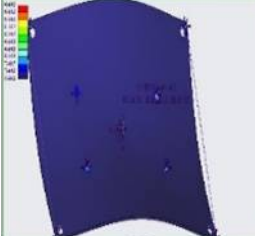
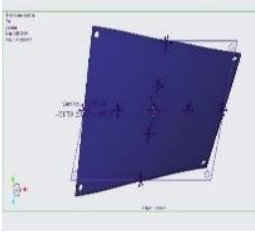
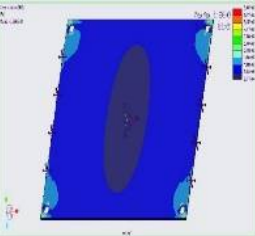
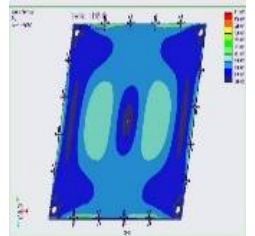
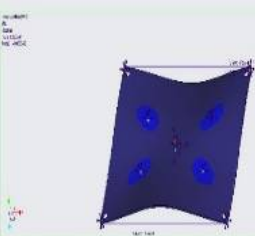
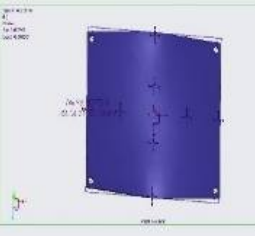
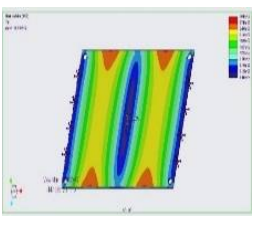
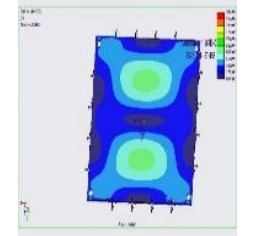
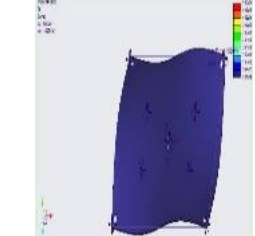
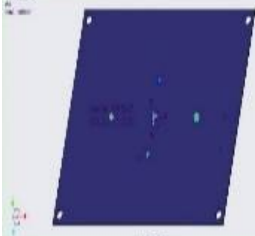
ния компонентов с наибольшей деформацией и напряжением $3,24 \cdot E^9$ Па и $1.87 \cdot 10^9$ Па.

3. По результатам замечено, что всякий раз, когда компонент находится далеко от центра платы, это вызывает более высокое значение напряжения. Поэтому не рекомендуется размещать электронные компоненты в двух координатах, как в способе 3 (табл. 3).

4. Показано, что нежелательно фиксировать точки с координатами (a / 4, b / 4), которые наиболее подвержены нагрузкам.

Таблица 4

Распределение напряжений σ . Без электронных компонентов

Способ 1	Способ 2	Способ 3	Способ 4
			
Первая собственная частота $4 \cdot 10^7$	Первая собственная частота $6.87 \cdot 10^7$	Первая собственная частота $3.5 \cdot 10^8$	Первая собственная частота $5.3 \cdot 10^8$
			
Вторая собственная частота $6 \cdot 10^7$	Вторая собственная частота $1.1 \cdot 10^8$	Вторая собственная частота $2.5 \cdot 10^8$	Вторая собственная частота $5.4 \cdot 10^8$
			
Третья собственная частота $2.9 \cdot 10^7$	Третья собственная частота $1.68 \cdot 10^8$	Третья собственная частота $5.196 \cdot 10^8$	Третья собственная частота $3.8 \cdot 10^8$

Результат и обсуждение

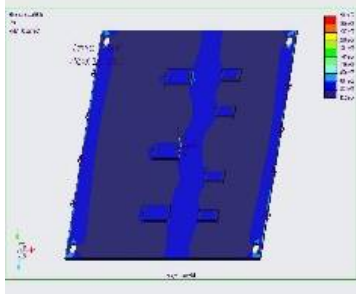
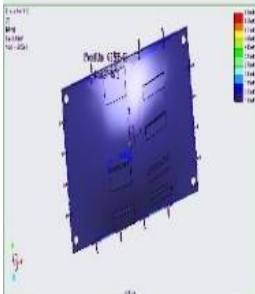
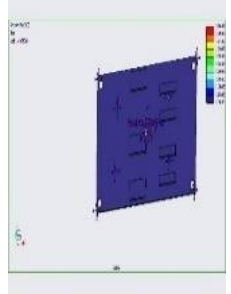
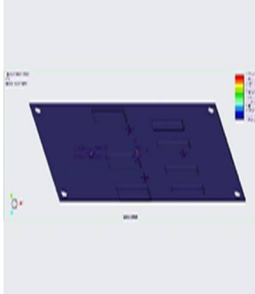
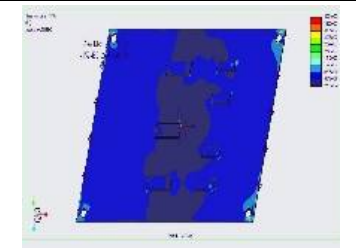
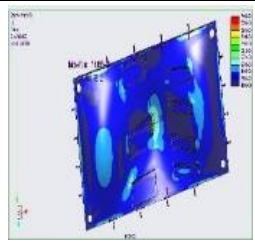
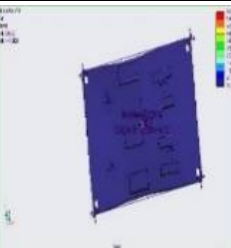
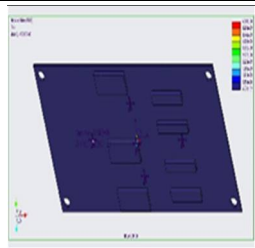
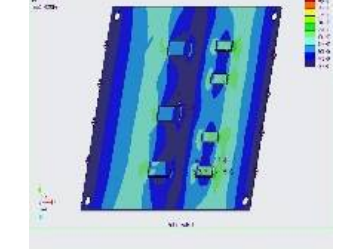
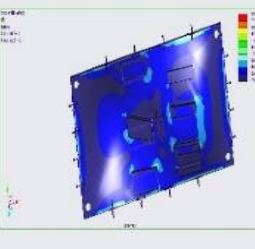
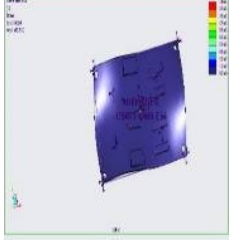
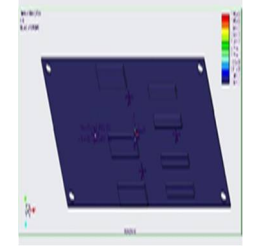
По результатам анализа случайных колебаний Сгео, известно, что максимальное напряжение в конструкции возникает на границе раздела горизонтальных и вертикальных

пластин, а величина напряжения составляет $0.113 E^8$ Па.

Согласно [9] отношение S-N-кривые алюминиевой пластины между 10^3 и 10^7 выражается следующим образом:

$$\log N = 57.78 - 6.6489 \log \sigma \quad (6)$$

Распределение напряжений σ . Второй случай

Способ 1	Способ 2	Способ 3	Способ 4
			
Первая собственная частота $2.9 \cdot 10^7$	Первая собственная частота $4.5 \cdot 10^7$	Первая собственная частота $1.87 \cdot 10^9$	Первая собственная частота $3.7 \cdot 10^8$
			
Вторая собственная частота $4 \cdot 10^7$	Вторая собственная частота $1.03 \cdot 10^8$	Вторая собственная частота $1.46 \cdot 10^9$	Вторая собственная частота $4.8 \cdot 10^8$
			
Третья собственная частота $4.2 \cdot 10^7$	Третья собственная частота $7.5 \cdot 10^7$	Третья собственная частота $2 \cdot 10^9$	Третья собственная частота $3.7 \cdot 10^8$

Используя данные формул (4) и (5) с учётом количества циклов нагрузки, определяемых (6), получаем соотношение для расчета времени усталостной долговечности:

$$T = \frac{1}{(0.683V+T)/N_{1\sigma} + 0.27V+T)/N_{2\sigma} + 0.043V+T)/N_{3\sigma}} \quad (7)$$

Усталостный ресурс приведен в табл. 6, 7.

Отметим влияние изменения усталостной прочности в зависимости от способа монтажа. Результаты теоретических расчетов и моделирования идентичны при анализе первой собственной частоты.

Таблица 6

Оценка усталостной прочности печатной платы (первый случай)

Способ 1 (1)	Способ 2 (1)	Способ 3 (1)	Способ 4 (1)
$15 \cdot 10^2$	20	$14 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-2}$

Таблица 7

Оценка усталостной прочности печатной платы (второй случай)

Способ 1 (2)	Способ 2 (2)	Способ 3 (2)	Способ 4 (2)
$9 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^2$	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-3}$

Заключение

В данной работе предлагается новая методика определения оптимальной конструкции печатной платы с разными способами закрепления и определения оптимальных точек крепления.

Показана взаимосвязь между механическим напряжением и методами фиксации печатной платы. Показано, что наименее предпочтительным является вариант крепления платы с точками, имеющими координаты, с соотношением $a/4$ и $b/4$, где a и b длина и ширина печатной платы.

Также рекомендуется избегать размещения электронных компонентов вблизи краев и точек крепления, так как они наиболее уязвимы к нагрузкам.

В данной работе с помощью САПР Creo прогнозируется усталостная прочность конструкции печатной платы при различных условиях монтажа компонентов и предлагается оптимальная конструкция. Данный подход позволяет значительно повысить эффективность процесса проектирования печатных плат.

Литература

1. Вишневский А.М., Городецкий Б.Н. Проблема обеспечения электромагнитной безопасности современных морских технических объектов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № 1 (387). С. 143-154.
2. Воробьев Д.В., Реуга Н.С., Горячев, Н.В. Характеристики и источники механических воздействий на радиоэлектронные средства // Молодой ученый. 2014. № 19. С. 182-185.
3. Методика выбора оптимального расположения компонентов на многослойных печатных платах с учетом внешних механических воздействий / З.Х.М. Аль-Араджи, О.Ю. Макаров, А.В. Муратов, А.В. Турецкий,

Х.А. Суайкат // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 3. С. 65-72.

4. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат средствами CAE анализа / З.Х.М. Аль-Араджи, А.В. Муратов, А.В. Турецкий, Ю.В. Худяков // Надежность и качество: сб. тр. междунар. симпозиума, 2018. Вып. 1. С. 224-227.

5. Гуревич Л.М., Волчков В.М., Даненко В.Ф. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Введение в Abaqus: учеб. пособие. Волгоград: ВолгГТУ, 2015. 92 с.

6. Тюфанова А.А. Повышение эксплуатационной надежности технических средств системы управления движением судов порта Новороссийск: дис. ...д-ра техн. наук: 05.22.19 / Тюфанова Анастасия Александровна. Новороссийск, 2010. 189 с.

7. Fatemi A., Yangt L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials // Int J. Fatigue. 1998. Vol. 20. P. 9-34.

8. Modelling and Experimental Research of Vibration N Properties of A Multi-Layer Printed Circuit Board / Z.H. Al-Araji, N.A. Swaikat, A. Muratov, and A.V. Turetsky // 4th Scientific International Conference Najaf (SICN). Al-Najef, Iraq, 2019. pp. 43-47.

9. You A., Be M. A. Y., In I. Fatigue life calculations of structural elements by means of equivalent load spectrum and material properties for LCF and HCF Fatigue Life Calculations of Structural Elements by Means of Equivalent Load Spectrum and Material Properties for. 2018. Vol. 020007.

10. Singh K.K., Singh N.K., Jha R. Analysis of symmetric and asymmetric glass fiber reinforced plastic laminates subjected to low-velocity impact // J. Compos. Mater. 2016. Vol. 50. № 14. P. 1853-1863.

11. Steinberg D.S. Vibration Analysis for Electronic Equipment. 3rd Edition, 2000. 440 p.

12. Miner, M.A. Cumulative damage in fatigue. J. Appl. Mech. 1945, 12, 159-164.

13. A new cumulative fatigue damage rule based on dynamic residual SN curve and material memory concept / Z. Peng, HZ. Huang, J. Zhou, YF. Li // Metals. 2018 Jun; 8(6). P. 456.

14. Стрижиус В.Е. Механизмы накопления усталостного повреждения при сложном программном нагружении слоистых композитов: существующие гипотезы // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 4. С. 71-82.

Поступила 21.04.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

Аль-Араджи Зайнаб Хуссам Моса – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alaraje@bk.ru

NEW METHOD FOR ESTIMATING THE FATIGUE LIFE OF A PRINTED CIRCUIT BOARD USING THE PRINCIPLE OF LINEAR ACCUMULATED DAMAGE UNDER VARIOUS BOUNDARY CONDITIONS

Z.H.M. Al-Araji

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: modern electronic components are subjected to various types of stress during operation, such as vibration and shock. Vibration loading, as one of the conditions for loading electronic components, has become a key factor in assessing the reliability of modern electronic systems. The challenge here is how to quickly and accurately perform a vibration fatigue analysis. Vibration damages the PCB and compromises the integrity of the solder joints due to overvoltage. Here I considered the technique, which differs from traditional ones, using the relationship between the methods of loading and fixing the board. The techniques previously proposed did not take into account the type of component mounting on the board and its effect on surface stress distribution. I show the relationship between mechanical stress and board fixation methods. An assessment of the fatigue strength of a printed circuit board to help the analyst make a relatively accurate prediction of induced fatigue life. The PTC Creo Parametric modeling process includes four boundary conditions (clamping) for the board to determine the best clamping method with the least stress. In addition, the definition of fatigue life using mathematical equations before the start of fixing reduces costs and time

Key words: printed circuit board (PCB), vibration, radio electronics, design, modeling, CREO Elements / Pro 7.0, fatigue damage, Three-interval method

References

1. Vishnevskiy A.M., Gorodetsky B.N. "The problem of ensuring electromagnetic safety of modern marine technical facilities", *Proc. of the Krylov State Scientific Center (Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra)*, 2019, no. 1, pp. 143-154.
2. Vorob'ev D.V., Reuta N.S., Goryachev N.V. "Characteristics and sources of mechanical influences on radio electronic equipment", *Young Scientist (Molodoy uchenyy)*, 2014, no. 19, pp. 182-185.
3. Al-araji Z.H.M., Makarov O.Yu., Muratov A.V., Turetskiy A.V., Suaykat H.A. "Technique for choosing the optimal arrangement of components on multilayer printed circuit boards, taking into account external mechanical influences", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 65-72.
4. Al-araji Z.H.M., Muratov A.V., Turetskiy A.V., Khudyakov Yu.V. "Modeling the mechanical characteristics of multilayer printed circuit boards using CAE analysis", *Proc. of the Int. Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: sb. tr. mezhdunar. simpoziuma)*, 2018, issue 1, pp. 224-227.
5. Gurevich L.M., Volchokov V.M., Danenko V.F. "Computer modeling of metal forming processes. Introduction to Abaqus" ("Komp'yuternoe modelirovaniye protsessov obrabotki metallov davleniem. Vvedeniye v Abaqus"), 2015, 92 p.
6. Tyufanova A.A. "Improving the operational reliability of technical means of the ship traffic control system in the port of Novorossiysk" ("Povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti tekhnicheskikh sredstv sistemy upravleniya dvizheniyem sudov porta"), Dr. of Tech. Sci. diss., Novorossiysk, 2010, 189 p.
7. Fatemi A., Yangt L. "Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials", *Int J. Fatigue*, 1998, vol. 20, pp. 9-34.
8. Al-Araji Z.H., Swaikat N.A., Muratov A., Turetskiy A.V. "Modeling and experimental research of vibration N properties of a multi-layer printed circuit board" // 4th Scientific International Conference Najaf (SICN). Al-Najef, Iraq, 2019. pp. 43-47.
9. You A., Be M.A.Y., In I. "Fatigue life calculations of structural elements by means of equivalent load spectrum and material properties for LCF and HCF", 2018, vol. 020007.
10. Singh K.K., Singh N.K., Jha R. "Analysis of symmetric and asymmetric glass fiber reinforced plastic laminates subjected to low-velocity impact", *J. Compos. Mater.*, 2016, vol. 50, no. 14, pp. 1853-1863.
11. Steinberg D.S. "Vibration analysis for electronic equipment", 2000, 440 p.
12. Miner M.A. "Cumulative damage in fatigue", *J. Appl. Mech.*, 1945, vol. 12, pp. 159-164.
13. Peng Z., Huang H.Z., Zhou J., Li Y.F. "A new cumulative fatigue damage rule based on dynamic residual SN curve and material memory concept", *Metals*, 2018 Jun, no. 8(6), pp. 456.
14. Strizhius V.E. "Mechanisms of fatigue damage accumulation under complex program loading of laminated composites: existing hypotheses", *Scientific and Technical Bulletin of SpbPU (Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU)*, 2019, vol. 25, no 4, pp. 71-82.

Submitted 21.04.2021; revised 21.06.2021

Information about the author

Zainab Hussam Mosa Al-Araji, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: alaraje@bk.ru

СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ГОТОВНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Д.В. Журавлёв, А.А. Проводников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: благодаря общедоступности и развитию персональных вычислительных устройств стало возможным интегрировать их с системами телемедицины для различных целей. Особенно актуально создание высокоэффективных радиотехнических средств для систем дистанционного контроля и оценки функционального состояния человека. В статье представляется разработанный микродатчик-регистратор на основе микросхемы BMD101, позволяющий передавать информацию по радиоканалу, организованному на микросхеме BK3231 и проводить комплексную экспресс-оценку функциональной готовности человека с использованием методов неинвазивной диагностики. В режиме реального времени обнаружить сердечный ритм позволяет цифровая обработка сигнала, которая способна также произвести фильтрацию помех от промышленной силовой сети и помех, связанных с движением. Приводится список рассчитываемых статистических показателей и спектральных характеристик, выделенных в системы, принятых в качестве Европейского стандарта при исследовании сердечной деятельности. Демонстрируются примеры физиологической интерпретации результатов, полученных с помощью данного программного обеспечения. Выполнен цикл тестирований и последующий анализ полученных результатов показателей функционального состояния у 25 человек различного возраста и спортивной подготовки. В ходе экспериментов установлены основные закономерности результатов. Результаты экспресс-оценки могут быть использованы спортсменами, любителями, персональными тренерами и командами в своей спортивной практике

Ключевые слова: микросхема BMD101, показатели функционального состояния, неинвазивная диагностика

Введение

В настоящее время, благодаря общедоступности и развитию персональных вычислительных устройств, таких как смартфоны, планшетные компьютеры, ноутбуки, стало возможным интегрировать их с системами телемедицины для различных целей. Такие устройства хорошо подходят для реализации этих систем, так как обладают необходимой вычислительной мощностью, большим дисплеем и встроенными интерфейсами для обмена данными по радиоканалу для подключения различных внешних устройств и обеспечения доступа в Интернет. Необходимое программное обеспечение позволит анализировать биомедицинскую информацию, полученную в результате работы распределенных систем мониторинга функциональных параметров человека, основанных на малогабаритных носимых регистрирующих устройствах.

Сейчас особенно актуально создание высокоэффективных радиотехнических средств для систем дистанционного контроля и оценки функционального состояния человека. Основными задачами развития миниатюрных радиотехнических устройств, предназначенных для медицинской отрасли, являются разработка и

исследование новейших устройств, которые будут обладать большой надежностью, небольшим весом и габаритами, малым энергопотреблением, доступной ценой.

Мобильный электрокардиограф можно использовать самостоятельно дома для отслеживания работы сердца. Он позволяет профессиональным спортсменам, тренерам, любителям контролировать работоспособность сердечной мышцы в течение тренировки, а также до и после нее. Статистика измерений позволяет оптимально корректировать физическую активность, разработать индивидуальную программу тренировок и избежать перенапряжения. С помощью электрокардиографа вы можете выполнять нагрузочные тесты и снимать электрокардиограмму в полевых условиях. Программные алгоритмы портативного электрокардиографа позволяют отслеживать динамику сердца за определенный период времени, сравнивать результаты и определять улучшения или ухудшения.

В связи с этим возникает необходимость разработать компактную информационно-вычислительную систему, которая позволит измерить функциональное состояние спортсмена и любителя, для проверки эффективности тренировок, уменьшения риска получения травм и улучшения результатов. Методикам, применяемым для обработки полученных ре-

зультатов, необходимо опираться на актуальные исследования мировых ученых и быть максимально открытыми. Если необходимо, система должна позволять изменять и дополнять базу методик, что возможно при внедрении гибкого интерфейса.

Аналоги

Целесообразно упомянуть основные существующие устройства, занимающие определенные доли мирового и Российского рынков изделий персональной медицинской техники, которые позволяют оценить спортивные результаты человека, проанализировав функциональные состояния определенных биологических систем неинвазивным способом. К таким системам относят: центральную нервную систему, сенсомоторную систему, энергетический метаболизм, автономную нервную систему и главным образом сердечно-сосудистую систему.

Это такие устройства, как кардиограф, разработанный, выпускаемый и продаваемый компанией ООО «Медицинские компьютерные системы» г. Зеленоград [1], микродатчик-регистратор для регистрации ЭКГ и температуры тела QardioCore, разработанный американской компанией Qardio, Inc [2], ЭКГ регистратор ECG Dongle, разработанный группой компаний «Нордавинд» [3], система Omegawave, разработанная финской компанией Omegawave Ltd [4].

Эти устройства дают возможность отобразить количественные данные, по которым можно оценить реакцию атлета на тренировки, увидеть картину утомления, восстановления и стрессовых состояний. Главный недостаток всех этих устройств – способность измерить состояние биологических систем только в условиях покоя человека.

Сейчас нет достоверных данных, которые могли бы сказать об эффективности и целесообразности методик оценки функционального состояния человека, что применяются в приведенных выше устройствах.

Материалы и методы

Разработка микродатчика-регистратора на основе микросхемы BMD-101

Зарегистрировать один канал ЭКГ возможно на основе микросхемы BMD101. Сухие или влажные электроды необходимо разме-

стить в непосредственной близости от сердца на груди человека. Для устранения влияния синфазных помех и различных артефактов движения микросхема BMD101 должна быть расположена также в непосредственной близости от электродов и сердца. Микросхема BMD101, выполненная по методу “система на кристалле” смешанного (аналого-цифрового) типа, содержит микроконтроллер, узлы аналоговой обработки сигнала, а также АЦП [5].

В состав аналоговой обработки сигнала входят несколько узлов. Идентифицировать сигнал в диапазоне от нескольких мкВ до десятка мВ помогает система обнаружения сигнала. Усилитель с минимальным уровнем шума, система фильтрации с заниженным дрейфом изолинии [6, 7], система автоматического включения/отключения процесса измерения передают сигнал на 16-битный АЦП высокого разрешения. В режиме реального времени обнаружить сердечный ритм позволяет цифровая обработка сигнала, которая способна также произвести фильтрацию помех от промышленной силовой сети и помех, связанных с движением пациента.

Итак, система на кристалле BMD101 включает в себя полную аналоговую и цифровую обработку сигнала и обеспечивает формирование пакетов для передачи регистрируемой информации по стандартному интерфейсу UART (Rx/Tx). Интерфейс UART поддерживает подавляющее большинство современных устройств.

Регистрируемую ЭКГ решено передавать по радиоканалу в режиме реального времени. Радиоканал был организован на микросхеме BK3231.

Добавлен акселерометр и термодатчик для регистрации дополнительных функциональных параметров человека.

Структурная схема показывает взаимосвязь блоков в устройстве. Блок аналоговой обработки сигнала (БАОС) содержит блок фильтрации (БФ), блок усиления сигнала (БУС) и блок коррекции сигнала (БКС). Блок регистрации и анализа (БРиА) включает блок аналого-цифрового преобразования (БАЦП), микроконтроллер (МК), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). Блок передачи информации (БПИ) состоит из блоков связи с персональным компьютером (БПК), индикации (БИ) и радиоканала (БРК). Аккумуляторная батарея (АКБ) и блок стабилизации напряжения (БСН) представляют блок питания (БП).

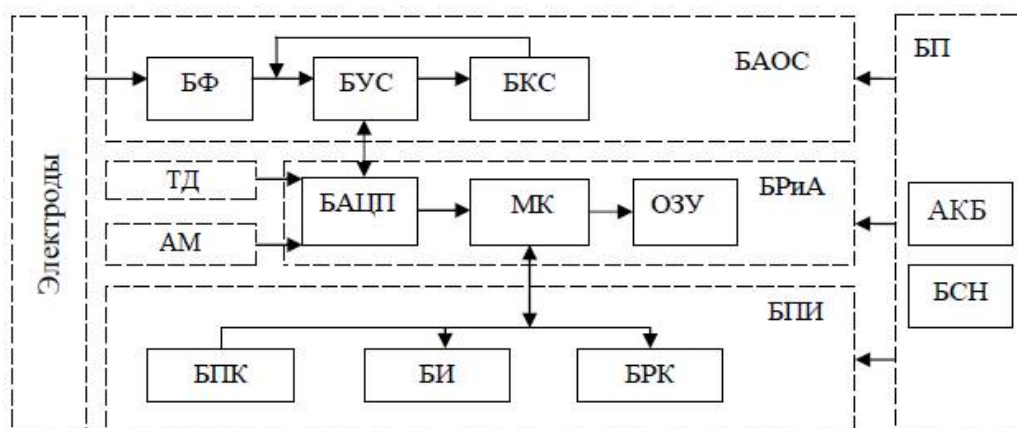


Рис. 1. Структурная схема устройства

Далее на основе представленных схемотехнических решений была разработана электрическая схема и спроектирована тестовая макетная плата микродатчика-регистратора. Разработка проекта печатной платы устройства проведена в САПР OrCAD 16.3.

Созданный макет микродатчика-регистратора на основе системы на кристалле BMD-101 имеет удовлетворительные характеристики, низкое энергопотребление и компактный размер.

В результате тестирования макета удалось успешно получить и передать по радиоканалу ЭКГ одного отведения.

Показатели функционального состояния человека

Организм каждого человека - это уникальный носитель различных форм информации, отражающих его сложную и многофункциональную структуру. Существуют инвазивные и неинвазивные методы получения информации о функциональном состоянии человека.

Неинвазивная процедура позволяет получать информацию о функциональном состоянии человека в любом месте, не нанося вреда его тканям и органам [8].

При разработке системы контроля функциональных показателей человека главными критериями являлись:

- построение системы на основе аппаратных средств, имеющихся у пациента;
- микроминиатюризация интеллектуальных датчиков;
- получение диагностируемой информации без вмешательства в работу организма человека.

Таким образом, функциональное состояние человека определялось с использованием методов исключительно неинвазивной диагностики.

Разработанная система комплексной экспресс-оценки функциональной готовности человека способна определить:

1. Готовность сердечно-сосудистой системы (ССС) к нагрузкам:

- индекс Руфье;
- математическое ожидание, M ;
- мода, M_0 .

2. Готовность вегетативной нервной системы (ВНС) организма к нагрузкам, включающую следующие основные расчетные показатели:

- ортостатическая проба;
- среднеквадратическое отклонение динамического ряда кардиоинтервалов, σ ;
- амплитуда моды, AM_0 ;
- вариационный размах, ΔX ;
- индекс вегетативного равновесия, $ИВР$;
- вегетативный показатель ритма, $ВПР$;
- показатель адекватности процессов регуляции, $ПАПР$;
- индекс напряжения регуляторных систем, $ИН$.

3. Готовность системы энергообеспечения к нагрузкам, включающую:

- индекс анаэробных возможностей, $ИАНВ$;
- индекс аэробных возможностей, $ИАВ$;
- максимальное потребление кислорода, $МПК$;
- коэффициент теплоотдачи.

4. Общую готовность организма:

- скаттерграмма;
- индекс функционального состояния, $ИФС$;

- спектральный анализ динамических рядов R-R интервалов;
- индекс централизации, *ИЦ*;
- индекс активации подкорковых нервных центров, *ИАП*;
- коэффициент восстановления пульса, *КВП*.

Результаты

Система комплексной экспресс-оценки функциональной готовности была протестирована на 25 людях, разделенных на 3 группы: 10 студентов, 10 спортсменов, 5 спортсменок. Возраст людей составил от 15 до 47 лет. Вес – от 51 до 91 кг.

Были проведены 3 тестовых замера по 5 минут: лежа, стоя и после нагрузки.

Приведём несколько примеров физиологической интерпретации результатов статистических показаний по полученным тестовым замерам.

Оценить готовность ССС к нагрузкам поможет индекс Руфье, который показывает, как реагирует сердце на физическую нагрузку. На рис. 2 представлены 3 графика, которые демонстрируют готовность ССС у 3 испытуемых групп.

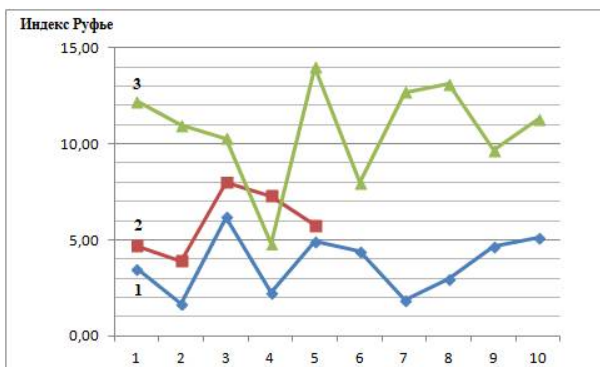


Рис. 2. Индекс Руфье: 1 – группа спортсменов, 2 – группа спортсменок, 3 – группа студентов

Результат можно интерпретировать следующим образом:

- 0 - 5 – хорошая работа сердца;
- 5 - 10 – средняя;
- 10 - 15 – удовлетворительная;
- 15 - 20 – плохая.

Распределение показывает, что сердечно-сосудистые системы испытуемых из спортивных групп хорошо готовы к нагрузкам, у группы студентов удовлетворительная реакция работоспособности сердца на нагрузку.

Готовность ВНС к нагрузкам показывает ортостатическая проба, позволяющая контролировать состояние своего организма и его адаптацию [9]. Рис. 3 отражает графики готовности ВНС у 3 испытуемых групп.

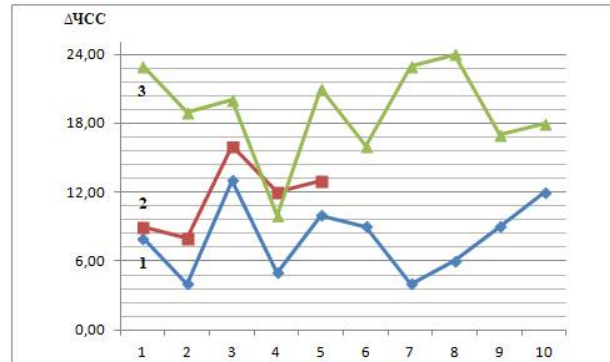


Рис. 3. Ортостатическая проба: 1 – группа спортсменов, 2 – группа спортсменок, 3 – группа студентов

Разница ударов говорит нам о степени тренированности и определяется:

- 0 - 12 ударов – хорошо тренированный человек;
- 13 - 18 ударов – человек здоров, но не спортивен;
- 18 - 25 ударов – полное отсутствие тренировок.

Если разница превышает 25 ударов, то это может говорить о сердечно-сосудистых заболеваниях или иных проблемах со здоровьем.

Показатели ортостатической пробы коррелируют с индексом Руфье и отражают лучшую готовность ВНС к нагрузкам у спортивных групп.

Система комплексной экспресс-оценки позволяет построить скаттерграмму - автокорреляционное облако, которая дает возможность выделять нормосистолию, тахисистолию, тахикардию, брадикардию, проанализировать сердечные аритмии [10]. На рис. 4 представлена скаттерграмма одного из участников тестирования из группы спортсменов после нагрузки.

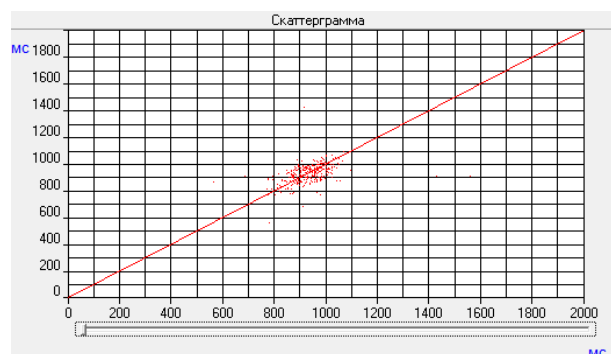


Рис. 4. Скаттерграмма спортсмена после нагрузки

Общую готовность организма можно оценить с помощью спектрального анализа ритмограммы, который количественно показывает частотные составляющие колебаний сердечного ритма (HF, LF и VLF). Также отразить активность определенных звеньев регуляторного механизма позволяет графическое представление соотношения различных составляющих сердечного ритма. Используются параметрический (алгоритм Берга) и непараметрический (алгоритм быстрого преобразования Фурье) методы расчета спектральной плотности мощности. На рис. 5 представлен спектральный анализ тестовой ритмограммы студента лежа непараметрическим методом.

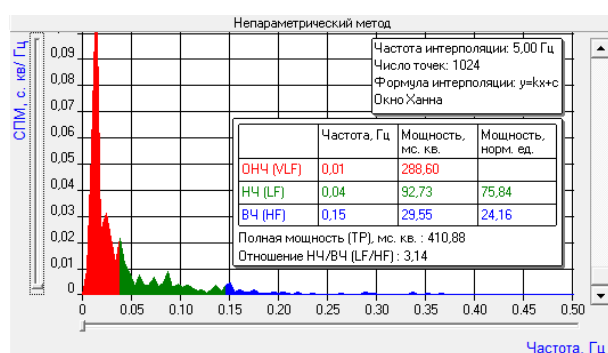


Рис. 5. Спектральный анализ тестовой ритмограммы студента лежа

Физиологическая интерпретация результатов спектрального анализа в каждом конкретном случае может проводиться врачами на основе сравнения рассчитанных показателей для разных групп людей. Важно иметь в виду, что полученная статистика верна только для этого метода спектрального анализа с его особенностями.

Заключение

Разработанное устройство не уступает по показателям энергопотребления, стоимости, размерам и весу в сравнении с аналогами, а также имеет ряд преимуществ:

1. Для расчета массы тела, аэробных и анаэробных возможностей интегрирован акселерометр;
2. Для расчета коэффициента теплоотдачи и максимального потребления кислорода установлен термодатчик;
3. Повышена мобильность, удобство использования и компактность ввиду исключения внешних проводов;
4. Расчет показателей проводится в реальном времени.

Все представленные показатели, которые рассчитываются и усредняются в реальном вре-

мени, дают возможность комплексно оценить функциональное состояние человека. Программное обеспечение устройства производит запись ритма электрокардиограммы, что позволяет профессиональным медицинским работникам вести учет и наблюдение за сердечной деятельностью пациентов, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями. Персональные тренеры могут отслеживать в динамике показатели спортсменов и в соответствии с этим разрабатывать комплексы тренировок. Например, сравнительный анализ показателей в течение нескольких сезонов позволит команде скорректировать интенсивность, объем физической активности и время восстановления для спортсмена.

Разработанное устройство рассчитывает основные показатели функционального состояния человека в автоматическом режиме. Более того система умеет определять новые показатели функционального состояния атлета по предложенным методикам, а также добавлен ряд тестов (осуществляемых в автоматическом режиме) для выявления параметров подготовленности спортсмена и его физического уровня. Полноценный анализ функционального состояния спортсмена позволяет оптимизировать его готовность к игре или тренировке, достигая максимальных результатов, а также заметить отклонения от нормы.

При этом по сравнению с аналогами система является более миниатюрной и ориентированной на постоянное применение в процессе тренировок и повседневной жизни.

Литература

1. URL: <https://shop.kardi.ru/catalog/pribory/kardiru/>
2. URL: <https://www.getqardio.com/qardiocore-wearable-ecg-ekg-monitor-iphone/>
3. URL: <https://go.nordavind.ru/#Developers>
4. URL: <https://www.omegawave.com/>
5. URL: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/836731/NeuroSky/BMD101/1>
6. Исследование усилителя биопотенциалов для носимых устройств, работающих в информационно-телекоммуникационной системе контроля функционального состояния человека / В.А. Мальцев, А.В. Пищулин, М.А. Сиваш, Д.В. Журавлев // Цифровая трансформация в энергетике: материалы всерос. науч. конф., 2020. С. 320-324.
7. Журавлёв Д.В., Шубин М.В. Аналоговые узлы преобразования сигнала в индивидуальных приборах регистрации функциональных параметров операторов // XLVIII Огарёвские чтения: материалы науч. конф. Саранск, 2020. С. 159-163.
8. Макаров Л.М. Холтеровское мониторирование. М.: Медпрактика, 2003. 314 с.
9. Анализ variability сердечного ритма в оценке состояния здоровья у людей, работающих в условиях хронического стресса / А.П. Берсенева, Е.Ю. Берсеньев, А.К. Ешманова, Л.А. Денисов, Р.М. Баевский // Вари-

бельность сердечного ритма: теоретические аспекты и практическое применение. Ижевск, 2008. Т. VI. С. 34–36.
10. Кузнецов А.А. Вариабельность сердечного рит-

ма в прогнозной диагностике // Циклы: материалы IV междунар. конф. Ставрополь: Изд-во Сев.-Кав. ГТУ, 2002. Ч. 1. С. 185-190.

Поступила 19.05.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

Журавлёв Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: ddom1@yandex.ru

Проводников Александр Андреевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: a.provodnikov@mail.ru

SYSTEM OF COMPREHENSIVE EXPRESS EVALUATION OF HUMAN FUNCTIONAL READINESS

D.V. Zhuravlev, A.A. Provodnikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: due to the general availability and use of various computing devices, it has become possible to integrate them with telemedicine systems for various purposes. It is especially important to create highly efficient radio-technical means for remote control systems and functions of a human's functional state. In the article, we developed a microsensor-recorder based on the BMD101 microcircuit, which makes it possible to transmit information over a radio channel organized on a microcircuit, BK3231 and to conduct a comprehensive express assessment of a human's functional readiness using non-invasive diagnostic methods. Real-time heart rate detection is possible through digital signal processing, which can also filter out industrial power and motion noise. We give a list of the calculated statistical indicators and spectral characteristics allocated to the systems adopted as the European standard for the study of cardiac activity. We show the examples of the physiological interpretation of the results obtained using this software. We carried out a cycle of tests and the subsequent analysis of the results obtained for the indicators of the functional state in 25 people of different ages and sports training. In the course of the experiments, we established the main regularities of the results. The results of the express assessment can be used by athletes, amateurs, personal trainers and teams in their sports practice

Key words: BMD101 microcircuit, functional state indicators, non-invasive diagnostics

References

1. URL: <https://shop.kardi.ru/catalog/pribory/kardiru/>
2. URL: <https://www.getqardio.com/qardio-core-wearable-ecg-ekg-monitor-iphone/>
3. URL: <https://go.nordavind.ru/#Developers>
4. URL: <https://www.omegawave.com/>
5. URL: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/836731/NeuroSky/BMD101/1>
6. Maltsev V.A., Pishchulin A.V., Sivash M.A., Zhuravlev D.V. "Investigation of the biopotential amplifier for wearable devices operating in the information and telecommunications system for monitoring the functional state of a person", *Proc. of the All-Russian Scientific Conf. (Tsifrovaya transformatsiya v energetike: materialy vseros. nauch. konf.)*, 2020, pp. 320-324.
7. Zhuravlev D.V., Shubin M.V. "Analog nodes of signal conversion in individual devices for recording functional parameters of operators", *Proc. of the Scientific Conf.: Ogaryev's Readings (XLVIII Ogarovskie chteniya: materialy nauch. konf.)*, 2020, pp. 159-163.
8. Makarov L.M. "Holter monitoring" ("Kholterovskoe monitorirovanie"), Moscow, Medpraktika, 2003, 314 p.
9. Berseneva A.P., Bersenev E.Yu., Eshmanova A.K., Denisov L.A., Baevsky R.M. "Analysis of heart rate variability in assessing health status in people working under chronic stress", *Heart Rate Variability: Theoretical Aspects and Practical Application (Variabel'nost' serdechnogo ritma: teoreticheskiye aspekty i prakticheskoe primeneniye)*, Izhevsk, 2008, vol. VI, pp. 34–36.
10. Kuznetsov A.A. "Heart rate variability in predictive diagnostics", *Proc. of IV Int. Conf.: Cycles (Tsikly: materialy IV mezhdunar. konf.)*, Stavropol, 2002, 185–190.

Submitted 19.05.2021; revised 21.06.2021

Information about the authors

Dmitriy V. Zhuravlev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: ddom1@yandex.ru

Aleksandr A. Provodnikov, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: a.provodnikov@mail.ru

РЕАЛИЗАЦИИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ПЛИС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТНЫХ РЕСУРСОВ

М.В. Хорошайлова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: приведено исследование, направленное на анализ различных решений для реализации архитектуры нейронной сети на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) с использованием ускорителей с плавающей запятой. В частности, исследуются две разные реализации: высокоуровневая архитектура для создания нейронной сети на основе программного процессора с различными стратегиями повышения производительности процесса и низкоуровневая архитектура, построенная с использованием каскада арифметических элементов с плавающей запятой, синхронизируемых и координируемых конечным автоматом, описанным на языке высокого уровня VHDL, который реализовал вычисление с плавающей запятой полной точности за долю времени выполнения. Это может принести пользу модели, позволяя включать в систему стандартные интерфейсы (такие как JTAG или I2C), полезные для многих приложений, при сохранении RTL-контроля над потоком данных. Анализ производительностей каждой из архитектур сведен в таблицы. Результаты, полученные в ходе этой работы, могут перейти в новую форму реализации нейронной сети на ПЛИС. Приведены сравнения достигнутой производительности с точки зрения затрат времени и ресурсов ПЛИС, используемых для архитектур. Используя аппаратное ускорение программного процессора для операций с плавающей запятой, было реализовано и протестировано на производительность альтернативное полиномиальное приближение для функций активации

Ключевые слова: ПЛИС, плавающая точка, нейронные сети, VHDL, высокоуровневая архитектура, производительность

Введение

ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы) очень распространены в области вычислительной электроники [1-3]. Модели цифровой обработки сигналов (DSP) демонстрируют серьезные ограничения производительности, когда они реализованы во встроенных системах, недостатком которых являются низкие операции с плавающей запятой в секунду (FLOPS) [4]. По сравнению с реализацией микроконтроллера (основанной на последовательном выполнении инструкций центральным процессором) ПЛИС использует концепции настройки и распараллеливания для повышения пропускной способности вычислительной системы [5]. Разработчик создает с помощью языка описания оборудования (HDL) внутреннюю архитектуру системы до уровня передачи регистров (RTL), фактически определяя гибкую интегральную схему для конкретных приложений (ASIC). Распараллеливание распространяет модульные и последовательные алгоритмы на параллельный интерфейс, повышая производительность сложных алгоритмов за счет мультипликативного фактора.

Нейронные сети во встроенных системах часто реализуются на микроконтроллерах. Реализация нейронной сети на микроконтроллере, даже если она построена с использованием простой целочисленной арифметики, не обладает улучшением производительности параллельной схемы. Выбор реализации архитектуры нейронной сети на ПЛИС выигрывает от настройки и распараллеливания по-разному.

Очень большие нейронные сети прямого распространения (FFNN), особенно если они предназначены для работы с данными с плавающей запятой (FP), выполняют большое количество элементарных произведений и сумм. Более того, для каждого нейрона FFNN в скрытых слоях требуется вычисление нелинейной функции для определения значения активации нейрона. Без специального аппаратного обеспечения FP такие вычисления могут снизить общую производительность системы, что затрудняет использование модели в критически важных приложениях, таких как системы управления в реальном времени.

Концепция распараллеливания подразумевается в высокой производительности решений, описанных выше: LUT, определенный RTL, может вычислить произвольно сложную операцию за несколько тактов, предполагая, что память системы может содержать значе-

ния. То же самое можно сказать и об арифметических устройствах, которые могут использовать мощные конвейеры для ускорения вычислений. Однако количество взаимосвязей между нейронами экспоненциально растет с размером (с точки зрения входов и выходов) сети. Можно уменьшить сложность FFNN, разделив FFNN с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO) на меньшую и более простую FFNN с одним входом и одним выходом (SISO), которую можно легко обрабатывать параллельно с помощью многомерной декомпозиции функции.

Нейронная сеть с прямой связью

Нейронная сеть с прямой связью состоит из одного скрытого слоя из 10 нейронов с нелинейной функцией активации Logsig (уравнение 1) и \ или Tansig (уравнение 2):

$$act = \frac{1}{1 + e^{-nst}}, \quad (1)$$

$$act = \frac{2}{1 + e^{-2nst}} - 1. \quad (2)$$

Эта архитектура была выбрана из-за простоты процесса обучения и модульности структуры: действительно, можно столкнуться с проблемами MIMO, используя SISO FFNN. Сеть FFNN была создана и обучена в среде Matlab. Нормализация входов и выходов была отключена, и функция активации выходного слоя была чисто линейной функцией.

Реализация на программном процессоре Nios II / f

Первое решение, в котором была предпринята попытка реализовать сеть на ПЛИС, использует процессор с программным ядром Nios II / f, выпущенный Altera в качестве скрытого ядра. Это ядро может быть синтезировано с использованием всего 1600 логических элементов (LE) и поддерживает максимальную частоту 140 МГц.

После синтеза и программирования на устройстве ПЛИС само программное ядро может быть запрограммировано и отлажено на языке C с использованием цепочки инструментов JTAG. Этот процессор с программным ядром поддерживает аппаратное целочисленное умножение и деление, а также до 255 пользовательских инструкций, определяемых разработчиком. Эти пользовательские инструкции

могут быть определены на уровне RTL с использованием языка описания оборудования (VHDL) для очень высокоскоростных интегральных схем (VHSIC) или кода Verilog R и синтезированы как параллельные блоки внутреннего арифметико-логического блока (ALU) Nios II, как показано на рис. 1, когда настраиваемая инструкция вызывается из памяти инструкций Nios II, операнды передаются в настраиваемой логике, и, в соответствии с типом настраиваемой инструкции (комбинаторной или последовательной), результат собирается в течение определенного количества циклов.

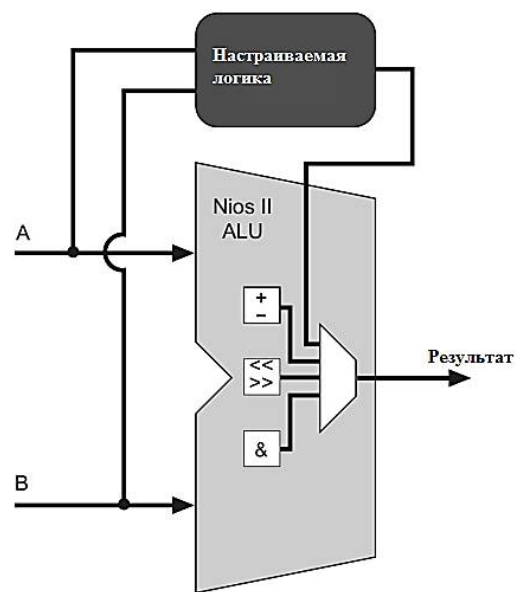


Рис. 1. Реализация пользовательской логики в Nios II ALU

Общее описание системы

Конструкция, предложенная здесь, основана на ядре Nios II/f, модифицированном для того, чтобы иметь ALU с плавающей запятой и две системы работы с тактовой частотой 100 МГц, которая передается с помощью PLL со сдвигом фазы -3 нс для управления внешней 8 Мб SDRAM. Как показано на рис. 2, процессор был оснащен стандартным интерфейсом JTAG для программирования и счетчиком производительности для определения времени выполнения реализованного кода. ALU с плавающей точкой был стандартным блоком из библиотеки, выпущенной Altera как часть среды Quartus II R. Две функции активации LUT (s) были созданы в VHDL (одна для Tansig и одна для Logsig) и импортированы в модель в виде пользовательских инструкций пользователя.

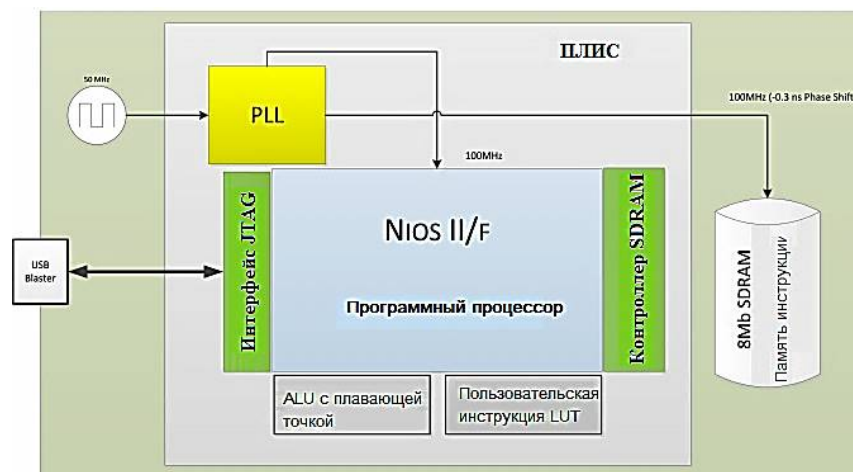


Рис. 2. Программный процессор и периферийные устройства

Использование

LUT (ов) для вычисления функции активации

Основное ограничение производительности нейронных сетей, использующих арифметику с плавающей запятой, заключается в вычислении функции активации для скрытого слоя. Вычисление этой функции с использованием программных функций «полной точности» часто оказывается слишком медленным для критичных ко времени приложений. Вместо вычисления функции активации альтернативным решением является ее выборка, загрузка полученных значений в LUT.

Это дает более точную выборку около начала координат, постепенно расширяющуюся около точек насыщения. Функция Logsig была выбрана с 256 значениями от -16 до +16, в то время как Tansig, будучи нечетной функцией, была выбрана только для положительных аргументов, с 256 значениями от 0,2 до 1. Используя эти значения, комбинаторный код VHDL был написан и смоделирован в среде Altera ModelSim для анализа RTL.

Реализованный блок имеет единственный вход с плавающей запятой, который разделен на знак, экспоненту и мантиссу. Благодаря использованию подходящей цепочки IF-THEN-ELSE входное значение обращается к определенной записи в LUT, которая распространяется как выход. Если величина входного значения больше значений насыщения, подходящее постоянное значение распространяется как выходное. Так как Tansig рядом с началом координат может быть аппроксимирован биссектрисой первого квадранта, значения меньше 0,2 передаются напрямую на выходе (таким обра-

зом аппроксимируя функцию линейно). Результатом синтеза этой структуры IF-THEN-ELSE является очень длинная цепочка компараторов. Распространение сигнала по этой цепочке может быть долгим, поэтому для обеспечения стабильности результата была введена настраиваемая задержка в 4 тактовых цикла (задержка контролируется простым счетчиком, который может быть изменен в соответствии с размером LUT).

Подгонка полиномов

Основные операции математики с плавающей запятой значительно упрощаются благодаря наличию ALU с плавающей запятой (примерно в 10 раз быстрее). Таким образом, помимо ускорения части FFNN, связанной с накоплением множителей, этот аппаратный модуль можно использовать для вычисления полиномиального приближения функции активации. Группа полиномов второй степени была выбрана для соответствия функциям активации. Коэффициенты полиномов были определены в среде Matlab R с использованием инструмента Curve Fitting Tool. Обе функции подходят только для положительных аргументов.

Для подбора полинома Logsig была реализована функция (обозначаемая как 5 PY-L), составленная суперпозицией 5 полиномов второй степени. Даже если функция Logsig не является нечетной, частичная симметрия присутствует. Это было использовано для его отрицательных аргументов: сначала значение функции вычисляется с учетом абсолютного значения входного сигнала; затем, если вход отрицательный, вычисленное значение вычитается на значение 1.

Для подбора полинома Tansig были реализованы две функции, состоящие из 4 и 5 полиномов второй степени, соответственно обозначенных как 4PY-T и 5PY-T. На этот раз, поскольку Tansig является нечетной функцией, аргумент рассматривается в абсолютном значении, и знак непосредственно распространяется на выход.

Результаты тестирования и предложения

Модель использовалась для имитации FFNN, обученной функции $y = x^2$, и была протестирована на векторе из 2048 линейно разнесенных входов между -5 и +5. Результаты в табл. 1 и табл. 2, показаны характеристики с точки зрения среднеквадратичной ошибки (MSE) и времени выполнения различных решений, предложенных выше. В качестве эталонного времени исполнения в обеих таблицах показана производительность сети FFNN с полной программной реализацией функции активации.

Таблица 1

Результаты тестирования Nios II / f на FFNN с функциями активации Logsig

Функция	MSE	Среднее время/выборка
Плавающая точка	0,0000 (ref)	650 мкс
LUT (Logsig)	0.1598	17,5 мкс
5PY-L	0.0075	185 мкс

Таблица 2

Результаты испытаний Nios II/f на FFNN с функциями активации Tansig

Функция	MSE	Среднее время/выборка
Плавающая точка	0,0000 (ref)	715 мкс
LUT (Tansig)	0.0053	17,5 мкс
4PY-L	0.0039	142 мкс
5PY-L	0.0018	174 мкс

Реализация ядра NN

Здесь представлено решение, основанное на низкоуровневой архитектуре. Предложенная конструкция была использована для реализации того же FFNN, описанного ранее.

Общее описание системы

Принципиальная схема разработанного нейросетевого ядра приведена на рис. 3. Предлагаемая конструкция представляет собой вычислительное ядро, состоящее из высокопроизводительных арифметических блоков с плавающей запятой, разработанных Altera, поток данных которых управляется машиной конечных состояний (FSM), написанной на VHDL.

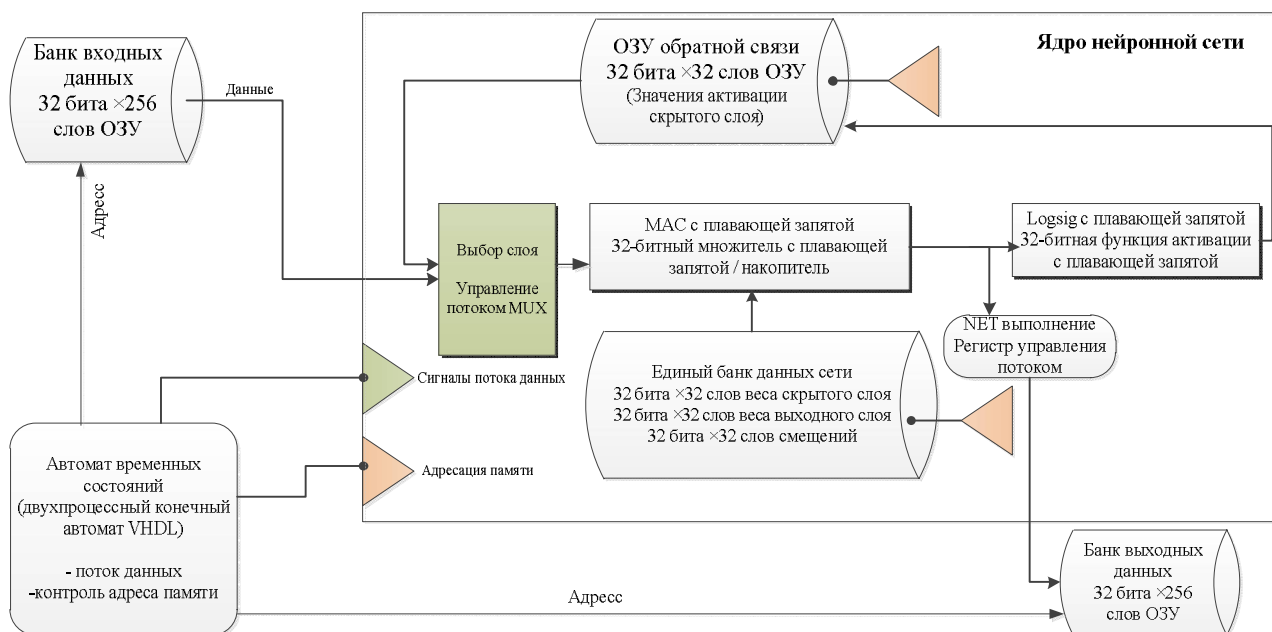


Рис. 3. Принципиальная схема ядра нейронной сети

Вычислительное ядро состоит из трех блоков: умножителя-накопителя (MAC), функции активации и ОЗУ обратной связи.

Эти три блока составляют подходящую основу для построения нейронной сети. Первый блок

вычисляет для каждого нейрона взвешенную сумму входных данных.

Второй блок использует результаты первого блока в качестве входных данных и вычисляет значения активации для скрытого слоя. Третий блок, получающий выходные данные от функционального блока активации, сохраняет значения из скрытого слоя. Эти значения затем отправляются через мультиплексор (MUX) обратно в блок MAC для вычисления выходного уровня. Как входные, так и выходные данные FFNN хранятся в блоках ОЗУ, которые доступны через интерфейс JTAG с помощью программного обеспечения Quartus II. Все ядро и банки данных управляются свободно работающим двухпроцессорным автоматом конечных состояний «Автомат временных состояний» с использованием сигналов управления потоком данных и адресных регистров. Внутренний поток данных ядра регулируется несколькими 32-битными мультиплексорами и триггерами DType (DFF). После синтеза и подгонки полная модель занимала около 5000 логических элементов (LE) и все 52 аппаратных умножителя, присутствующих на ПЛИС.

Поток данных арифметического ядра

Вычисление арифметического ядра начинается с загрузки первой выборки из банка входных данных в блок MAC. Ядро хранит в своей внутренней памяти веса и смещения FFNN. К этой памяти обращается непосредственно блок управления «Автомат временных состояний». Поскольку MAC вычисляет скрытый уровень, каждый нейрон будет иметь значение смещения, которое необходимо добавить к взвешенному входу. Это значение смещения предварительно загружается в 32-битный аккумулятор DFF с помощью MUX смещения. Входные данные и веса умножаются, а результаты добавляются к предварительно загруженному смещению (рис. 4). Поскольку скрытый слой имеет только один вход, MAC выполняется для первого нейрона, а результат передается в следующий блок, где вычисляется функция активации. В этом разделе над старшим битом входа работает логическое «НЕ», меняя его знак. Результат отправляется в экспоненциальный арифметический блок, выход которого подключен к сумматору, который суммирует результат до постоянного значения 1.

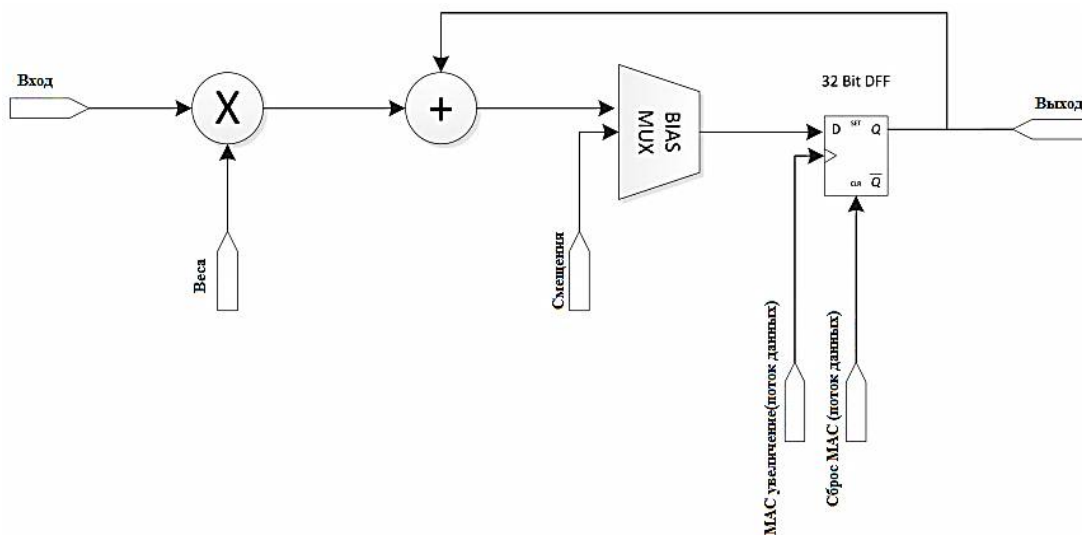


Рис. 4. Блок-схема MAC

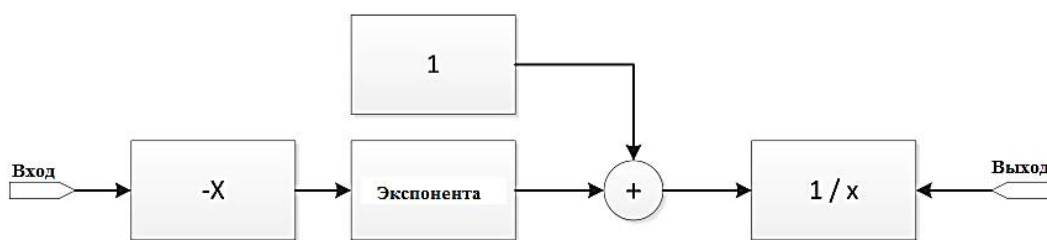


Рис. 5. Блок-схема Logsig

Затем результат инвертируется, и значение активации первого нейрона, наконец, записывается в ОЗУ обратной связи. Эта операция повторяется для 10 нейронов, заполняя оперативную память значениями активации скрытого слоя. Затем автомат временных состояний переключает мультиплексор выбора слоев, так что блок MAC теперь подключен к ОЗУ обратной связи. Смещение выходного нейрона предварительно загружается в аккумулятор, и MAC вычисляет взвешенную сумму всех значений активации из скрытого слоя. Это выходной результат сети, который сохраняется в банке выходных данных.

Автомат временных состояний FSM

Обработкой данных от ввода до вывода должен управлять какой-то блок управления, отвечающий за синхронизацию потока данных и, при необходимости, за адресацию памяти. В традиционном языке программирования, таком как C, популярным подходом к созданию такого контроллера является использование конечного автомата (FSM). В своей простейшей форме автомат представляет собой набор кодовых блоков, каждый из которых идентифицирует конкретную функцию (например, «загрузить данные из ОЗУ», «суммировать вход A и вход B», «транспонировать массив C») внутри структуры коммутатора. Если конечный автомат является единственным контроллером системы, структура коммутатора замкнута в бесконечный цикл. Переменная, управляющая переключателем, обновляется в конце каждого кодового блока, гарантируя, что каждый раз, когда переключатель оценивается, конечный автомат будет выполнять определенный кодовый блок (т.е. будет в известном и определенном состоянии). Этот довольно простой подход не так прост в языках HDL, поскольку код не выполняется процессором и, следовательно, не является последовательным по своей сути.

Необходимо создать оборудование, имитирующее последовательное поведение процессора. Возможный подход заключается в создании счетчика команд, значение которого увеличивается на каждом фронте тактового сигнала. При использовании сети компараторов, когда счетчик команд принимает определенное значение, выполняются определенные логические функции (состояния). Создание FSM таким образом дает важное преимущество: поскольку счетчик команд обновляется на тактовом фронте, FSM может работать синхронно с

другими элементами модели. Это очень важно, когда некоторые блоки в конструкции имеют определенные задержки ввода-вывода, так как FSM может быть запрограммирован и оставаться в состоянии "ожидания", пока выход не будет готов к распространению на следующий блок. В VHDL эта архитектура может быть определена с помощью двух блоков кода (процессов), одного последовательного и одного комбинаторного.

Создание конечного автомата, таким образом, дает важное преимущество: поскольку счетчик команд обновляется по фронту тактового сигнала, конечный автомат может работать синхронно с другими элементами конструкции. Это очень важно, когда некоторые блоки в проекте имеют определенные задержки ввода-вывода, поскольку конечный автомат можно запрограммировать так, чтобы он оставался в состоянии «ожидания», пока вывод не будет готов для распространения на следующий блок. В VHDL эту архитектуру можно определить с помощью двух кодовых блоков (процессов), одного последовательного и одного комбинаторного.

Первый отвечает за увеличение счетчика команд на каждом фронте тактового сигнала и синтезируется с регистром счетчика. Второй отвечает за декодирование счетчика команд в реальные логические сигналы и синтезируется с помощью сети компараторов. Цикл операций, выполняемых конечным автоматом, очевидно, ограничен, поскольку после выполнения последней операции (т.е. последнее выходное значение было загружено в банк выходных данных) конечный автомат сбрасывается и запускается заново. При тактовой частоте 50 МГц вычисление одной выборки занимает около 150 мкс.

Сравнение решений

В табл. 3 представлено сравнение лучших показателей среди проведенных исследований. При полной точности конструкция ядра NN обеспечивает значительно меньшее время вычислений, чем конструкция Nios II. Более того, при удвоении тактовой частоты через PLL (таким образом, используя ту же частоту, что и для конструкций Nios II, 100 МГц) время вычисления падает до 78 мкс/выборка. Однако если полная точность не требуется (и выбор конкретной функции активации не является обязательным), реализация FFNN на основе функции активации Tansig дает наименьшее

время вычислений с использованием конструкции Nios II. В частности, реализация LUT дает

наилучшие результаты с точки зрения точности по времени вычислений.

Таблица 3

Сравнение производительности

Функция	Среднеквадратичная ошибка	Среднее время/выборка	Полное время (2048 выборок)
NN Core (Тактовая частота 50 МГц)	0.0000 (ref)	154 мкс	315.4 мс
NN Core (Тактовая частота 50 МГц)	0.0000	78 мкс	159.8 мс
5PY-L	0.0075	185 мкс	378.8 мс
LUT (Tansig)	0.0054	17.5 мкс	35.79 мс

В табл. 4 и 5 показаны разделы в виде выделенных комбинаторных и регистровых логик (LC Comb. и LC Reg.). Решение высокого уровня является дорогостоящим с точки зрения использования ресурсов, достигая пика с 15 098 логическими элементами (LE), если оба LUT реализованы в виде пользовательских

инструкций. Как правило, в этом нет необходимости, поскольку в сети используется только одна из функций активации. Если исключить Logsig LUT из синтеза, использование LE снижается до 12 699 LE. Решение низкого уровня, хотя и полностью насыщает блоки DSP ПЛИС, содержится в 5 037 LE.

Таблица 4

Nios II / f использование моделью основных ресурсов по подразделениям

Элемент	LC Comb.	LC Reg.	DSP элементы
Nios II CPU	2382	1799	4
Блок с плавающей запятой	5125	3783	7
LUT (Tansig)	1815	4	0
LUT (Logsig)	1617	4	0

Таблица 5

Сравнение производительности

Элемент	LC Comb.	LC Reg.	DSP элементы
MAC блок	1015	620	7
Tansig блок	2784	1874	45
FSM блок	205	130	0

Заключение

Были представлены два возможных варианта реализации нейронной сети в среде ПЛИС. Первая разработка, использующая преимущества программного процессора Nios II, использовала аппаратные ускорители для увеличения вычисления элементарных нейронов и для увеличения вычислений нелинейных функций активации для скрытого слоя. Используя аппаратное ускорение программного процессора для операций с плавающей запятой, было реализовано и протестировано на производительность альтернативное полиномиальное приближение для функций активации.

Вторая предложенная схема состоит из цепочки арифметических блоков, синхронизируемых и координируемых конечным автоматом VHDL, который реализовал вычисление с плавающей запятой полной точности за долю времени выполнения. Результаты, полученные в этой работе, могут перейти в новую форму реализации нейронной сети на ПЛИС. Ариф-

метическая цепочка низкого уровня, реализованная в проекте NN Core, может быть разделена и включена в две пользовательские инструкции программного процессора, таким образом, сочетая скорость разработки низкого уровня с гибкостью C-программируемой среды. Это может принести пользу модели, позволяя включать в систему стандартные интерфейсы (такие как JTAG или I2C), полезные для многих приложений, при сохранении RTL-контроля над потоком данных.

Литература

1. Yajuan Ch. and Wu Q. Design and implementation of PID controller based on FPGA and genetic algorithm// Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics. Dalian: IEEE. 2011. pp. 308–311.
2. FPGA implementation of adaptive IIR filters with particle swarm optimization algorithm/G. Zhenbin, X. Zeng, J. Wang and J. Liu// 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems. Guangzhou: IEEE. 2008. pp. 1364–1367.
3. Artificial neural network acceleration on FPGA using custom instruction/ P. Santos, D. Ouellet-Poulin, D. Shapiro and M. Bolic// 24th Canadian Conference on Electri-

cal and Computer Engineering. Niagara Falls: IEEE. 2011. pp. 000450–000455.

4. ALTERA. Nios II Custom Instruction: User Guide. 11.0. San Jose, 2011. Available at: http://www.altera.com/literature/ug/ug_nios2_custom_instruction.pdf

5. 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.

6. 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.

7. Khoroshaylova M.V. LDPC code and decoding algorithms // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности: материалы II-й междунар. науч.-практ. конф.: в 2-х ч. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2015. С. 227-228.

Поступила 09.03.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

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

IMPLEMENTATION OF A NEURAL NETWORK ON FPGA USING HARDWARE RESOURCES

M.V. Khoroshaylova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article provides a study aimed at analyzing various solutions for implementing a neural network architecture on programmable logic integrated circuits (FPGAs) using floating point accelerators. In particular, two different implementations are being investigated: a high-level architecture for creating a neural network based on a software processor with different strategies to improve process performance, and a low-level architecture built using a cascade of floating point arithmetic elements, synchronized and coordinated by a state machine described in a high VHDL layer that implements full precision floating point computation in a fraction of the run time. This can benefit the model by allowing standard interfaces (such as JTAG or I2C) to be incorporated into the system that are useful for many applications, while maintaining RTL control over the data flow. I tabulated the performance analyzes for each architecture. The results obtained can go into a new form of implementation of a neural network on FPGA. I give comparisons of the achieved performance in terms of time and FPGA resources used for architectures. Using hardware acceleration of the software processor for floating point operations, I implemented and tested for performance an alternative polynomial approximation for activation functionse

Key words: FPGA, floating point, neural networks, VHDL, high-level architecture, performance

References

1. Yajuan Ch., Wu Q. “Design and implementation of PID controller based on FPGA and genetic algorithm”, *Proc. of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*, Dalian: IEEE, 2011, pp. 308–311.
2. Zhenbin G., Zeng X., Wang J., Liu J. “FPGA implementation of adaptive IIR filters with particle swarm optimization algorithm”, *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, Guangzhou: IEEE, 2008, pp. 1364–1367.
3. Santos P., Ouellet-Poulin D., Shapiro D., Bolic M. “Artificial neural network acceleration on FPGA using custom instruction”, *24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls: IEEE, 2011, pp. 000450–000455.
4. Altera, “Nios II custom instruction: user guide” 11.0. San Jose, 2011, available at: http://www.altera.com/literature/ug/ug_nios2_custom_instruction.pdf
5. 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 universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.
6. 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 universiteta)*, 2016, vol. 12, no 5, pp. 70-73.
7. Khoroshaylova M.V. “LDPC code and decoding algorithms”, *Proc. of the 2nd Int. Scientific-Practical Conf.: Anthropocentric Sciences: an Innovative Look at Education and Personal Development (Antropotsentricheskie nauki: innovatsionnyy vzglyad na obrazovaniye i razvitiye lichnosti: materialy II-oy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, 2015, pp. 227-228.

Submitted 09.03.2021; revised 21.06.2021

Information about the author

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.36622/VSTU.2021.17.3.019

УДК 544.6

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АВТОМАТИЗАЦИИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.П. Суворов¹, А.Э. Алешина¹, Т.П. Сафонова²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский индустриальный колледж, г. Воронеж, Россия

Аннотация: актуальность исследования обоснована расширением функциональных возможностей современных систем автоматизированного проектирования, которые включают в себя не только средства автоматизации большей части жизненного цикла изделия, но и применение облачных технологий, что существенно расширяет возможности их применения. В связи с этим статья направлена на раскрытие особенности применения современных средств автоматизированного проектирования и аддитивных технологий для изготовления сложных деталей или элементов конструкций в условиях единичного и опытного производства, когда необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований на основе проектирования и разработки сложнопрофильного электрод-инструмента для электрических методов обработки. В статье представлен метод проектирования и производства электрода-инструмента для электрических методов обработки с последующим нанесением токопроводящего покрытия, с использованием современных систем автоматизированного проектирования в опытно-конструкторском и единичном производстве. Материалы статьи представляют практическую ценность для предприятий машиностроительного комплекса, так как позволяют производить изменения технологии проектирования и изготовления сложных деталей или элементов конструкций. За счет применения современных системы автоматизированного проектирования и аддитивные технологии, что снижает себестоимость и повышает вариативность его применения

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, аддитивные технологии, электрод-инструмент, электрохимическая обработка

Введение

В настоящее время различные направления производства претерпевают изменения, связанные как с усложнением формы самого изделия, так и увеличением количества его составных элементов. Как правило, это обуславливается рядом факторов, к которым можно отнести как эстетические параметры будущего изделия, так и его эксплуатационных характеристики (прочность, масса, габариты). В связи с этим различные виды производств начинают внедрять в технологическую линейку новые типы оборудования и технологию, которая так или иначе упрощает такое производство. Не обходит стороной эта тенденция и машиностроительные предприятия.

В современном машиностроительном производстве достаточно давно используются системы автоматизированного проектирования (САПР), которые способствуют автоматизации всей технологической линейки производства [1]. Это способствует:

- снижению затрат;
- сокращению трудовых и экономических ресурсов;
- ускорению смены номенклатуры.

В первую очередь это обусловлено расширением функциональных возможностей современных САПР, в состав которых входит большее число компонентов, существенно расширяющих их функциональные возможности, что позволяет автоматизировать весь жизненный цикл продукта от проектирования поверхностей и создания концептуальных эскизов до анализа, инженерных расчетов симуляции физических процессов и автоматизации производства (рис. 1).

Как правило, в составе современных систем автоматизированного проектирования можно выделить:

- CAD – подсистема конструкторского проектирования (позволяющая реализовывать как 3D моделей, так и чертежей, конструкторской и технологической документации);
- CAE – подсистема анализа, симуляции и автоматизации инженерных расчетов;
- PDM – подсистема управления проектными данными об изделии;

- CAM – подсистема автоматизации процесса изготовления изделия;
- CNC – технологии, основанные на применение цифровых электронных устройств в системе управления.
- CRM – подсистема автоматизации взаимодействия пользователей как внутри организации, так и с точки зрения заказчик-клиент.

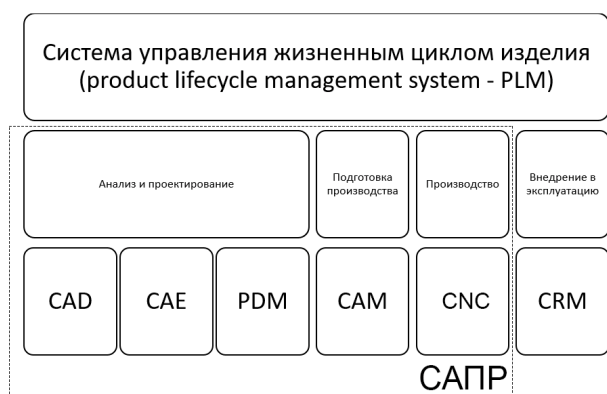


Рис. 1. Функциональные возможности современного САПР

Постановка задачи

В последнее время активное развитие получили системы автоматизированного проектирования, использующие ресурсы виртуальной вычислительной среды, а не на локальной машине.

Это существенно расширяет их функциональные возможности и позволяет использовать средства САПР через специальное приложение или непосредственно через браузер.

При этом такого рода системам свойственны два важных преимущества:

- серьезно расширяет возможности их использования за счет совместного использования при разработке сложных проектов в режиме реального времени;
- достаточно мощные функциональные возможности, позволяющие осуществлять автоматизации различного рода задач от моделирования и параметризации детали (рис. 2), реализации сборок и технической документации до автоматизации производства.

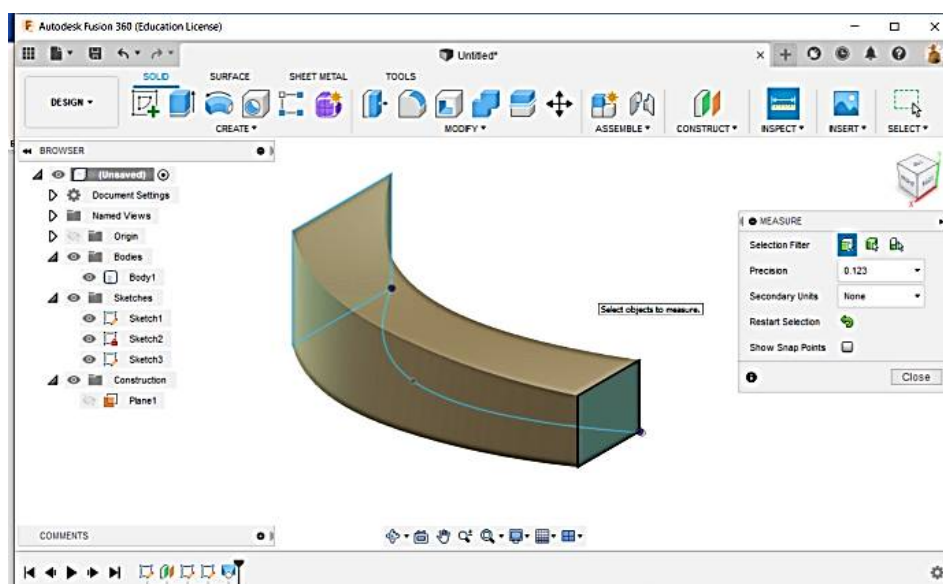


Рис. 2. Моделирование и параметризация в Autodesk Fusion 360

Это позволяет упростить и ускорить не только проектирование деталей и сборочных узлов, но и их производство как с помощью станков с числовым программным управлением, так и с помощью современных аддитивных технологий (рис. 3), применение которых способствует снижению себестоимости изготовления прототипа изделия.

Результаты

Применение в производстве такого рода инструментов позволяет на основе цифровой

трехмерной модели в кратчайшие сроки получить макет детали, прототип изделия или опытный образец.

В настоящее время аддитивные технологии активно развиваются и применяются в различных областях производства для реализации как опытных образцов изделий, так и для доработки конструктивных особенностей деталей перед запуском в серийное производство.

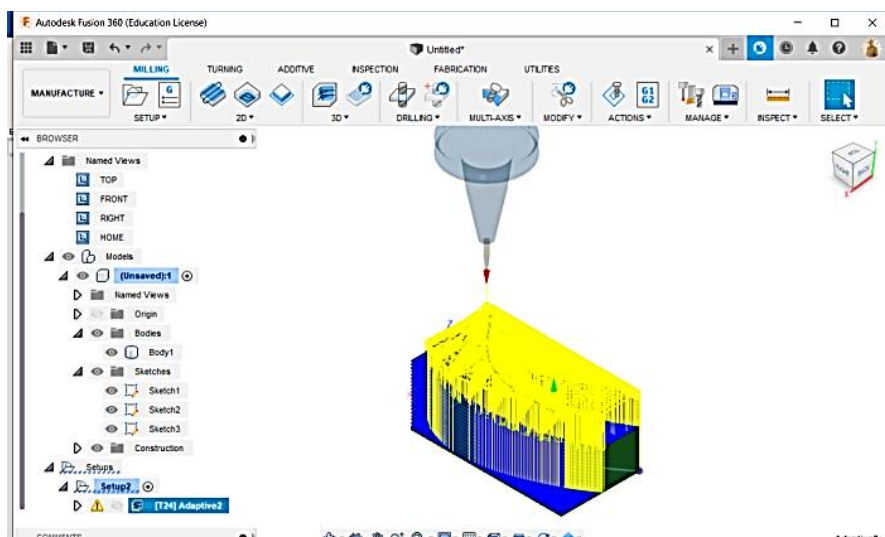


Рис. 3. Расчет траектории аддитивного производства в Fusion 360

Это позволяет использовать системы автоматизированного проектирования и аддитивные технологии как для реализации прототипов готового изделия, так и для различного рода оснастки.

В качестве примера можно привести предложенную авторами [2] методику проектирования и изготовления комбинированного электрода-инструмента для электронных методов обработки.

Применение при разработке такого рода электрода-инструмента облачных САПР способствует сокращению сроков его разработки и

в несколько раз укрощает методику расчета, проектирования и изготовления. Это обусловлено несколькими факторами:

1. Возможностью работы над одним инструментом группой из разных мест в режиме реального времени, что позволяет контролировать различные тонкости такого производства.

2. Применение развитых средств параметрического моделирования позволяет сократить сроки и стоимость расчета и изготовления ЭИ за счет математических зависимостей (рис. 4) [3].

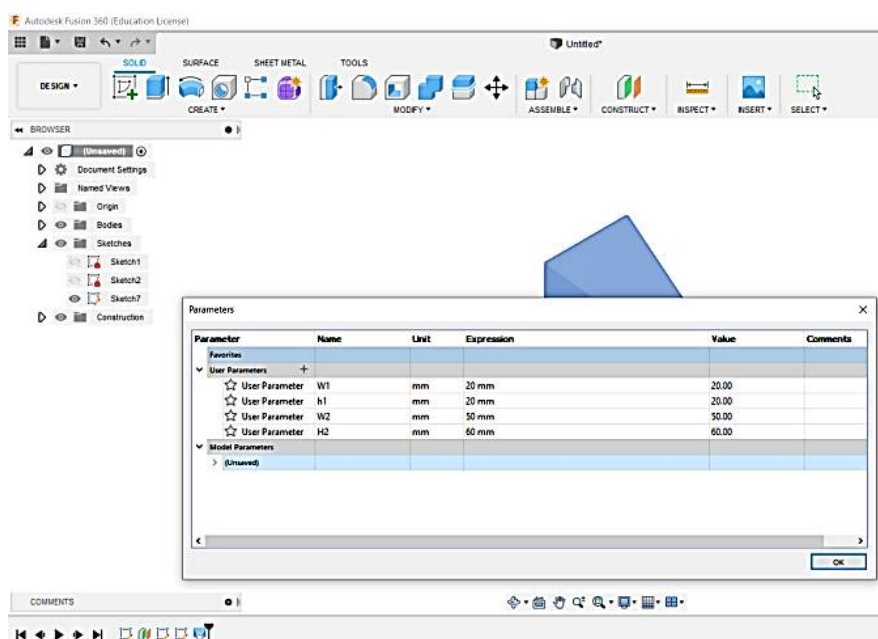


Рис. 4. Инструменты параметризации в Autodesk Fusion 360

Расчет, проектирование и создание такой оснастки для современных электрических ме-

тодов обработки вызывает ряд трудностей, в первую очередь связанных с тем, что построение

ние криволинейных профилей сечений электрода-инструмента должно учитывать параметры протекания процесса обработки и изменяющиеся значение межэлектродного зазора (МЭЗ). Автоматизированных средств, которые осуществляли бы учет параметров, определяющих характер изменения МЭЗ при расчете и проектировании различных видов электрод-инструментов, в настоящее время в литературе и на производстве выявлено не было. В связи с этим применение современных бесконтактных электрических методов обработки усложняется за счет индивидуального проектирования каждого ЭИ, а при его проектировании допускается большое количество допущения и упрощений.

Реализация такого ЭИ с использованием современных систем автоматизированного проектирования, базирующихся на виртуальной вычислительной среде и аддитивных технологий, позволяет существенно снизить трудоемкость и затраты на изготовление такого электрода-инструмента, особенно на этапе единичного и опытного производства, в условиях, когда требуется проведение различных видов научно-исследовательской деятельности или внедрение ее результатов на производство, что в свою очередь может требовать оперативного вмешательства в конструкцию оснастки или самого изделия.

Применение в этой связи аддитивных технологий дает возможность создания с помощью послойного синтеза сложной геометрии основания комбинированного электрода-инструмента на основе его цифровой модели (рис. 5, А), которая учитывает изменение контура электрода-инструмента с учетом величины межэлектродного зазора и особенностей его изменения с учетом износа в реальном времени.

Использование современных облачных САПР и аддитивных технологий на производстве дает возможность реализации комбинированного электрода-инструмента для электрических методов обработки, который характеризуется большим разнообразием формы рабочей поверхности, которая в свою очередь адаптирована к геометрии обрабатываемой поверхности и ее особенностей. Что в свою очередь позволяет реализовывать детали, имеющие поверхности любой сложности, и практическую возможность реализации основания для индивидуального инструмента в условиях опытного производства (рис. 5, Б).

После чего на его основе осуществляется создание комбинированного электрода-инструмента путем создания слоя токопрово-

дящего покрытия, обеспечивающего протекание электрических процессов (рис. 5, В).

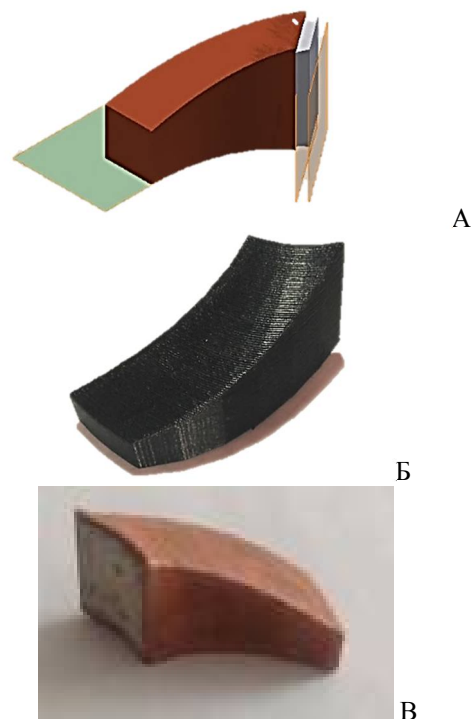


Рис. 5. Этапы создания комбинированного электрода-инструмента: А – создание цифровой модели инструмента, Б – изготовление основы ЭИ из токонепроводящего материала на основе аддитивных технологий, В – нанесение токопроводящего покрытия на пластиковую основу инструмента

Выводы

Применение современных информационных технологий при реализации как прототипов изделий, имеющих сложную геометрическую форму, так и сложной в изготовлении традиционными методами формообразования высокотехнологической оснастки весьма актуально и целесообразно. Это обуславливается тем, что применение современных аддитивных технологий и систем автоматизированного проектирования на основе облачных технологий позволяет упростить и автоматизировать расчет, проектирование и реализацию сложной геометрии изделия с учетом динамически изменяемых во времени различного рода параметров. Это осуществляется путем реализации следующих этапов проектирования и разработки:

- реализация цифровой модели на основе заданных математических закономерностей, учитывающих динамику изменения различного рода параметров;

- сохранение полученной цифровой модели в формате *.STL, *.WRL, *.PLY, *.3DS. и реализации программы для ее послойного синтеза на основе аддитивных технологий;

- реализация физической копии цифровой модели и создания рабочих поверхностей или требуемого качества изделия.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что применение современных информационных технологий, а именно систем амортизированного проектирования на основе облачных технологий и различных видов трехмерной печати, существенно упрощает и автоматизирует возможность реализации деталей и инструментов сложной формы, высокого качества и в кратчайшие сроки.

В свою очередь, это существенно расширяет возможности применения ресурсоемких отраслей производства в проведении теоретических и экспериментальных исследований за счет упрощения процесса внесения изменений в технологию проектирования и изготовления различного рода деталей, например электродов-инструментов для электрических методов обработки, что существенно расширяет область их технологического использования за счет снижения себестоимости и повышению вариативности их применения.

Литература

1. Суворов А.П. Использование современных информационных технологий при разработке сложнопрофильного электрод-инструмента // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. № 4. С. 11.
2. Суворов А.П., Кузовкин А.В. Использование аддитивных технологий в производстве фасонных поверхностей // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2. С. 9-15.
3. Суворов А.П., Кузовкин А.В. Параметрическое проектирование электрода-инструмента для электрообработки с помощью модуля ilogic // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 3. С. 105-109.
4. Смоленцев В.П. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. М.: Высш. шк., 1983. Т. 1. С. 247.
5. Немилев Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. Л.: Машиностроение, 1989.
6. Суворов А.П., Кретинин А.В., Кузовкин А.В. Методика изготовления сложнопрофильного электрода-инструмента по технологии быстрого прототипирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. № 2. С. 11-14.
7. Suvorov A.P. Design combined electrode-tool for electric methods of processing by means of its parameterization of CAD // Инфографика и информационный дизайн: визуализация данных в науке: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2017. С. 148-152.
8. Смоленцев В.П., Кузовкин А.В., Поташников М.Г. Проектирование технологической оснастки для электрических методов обработки. Воронеж: ВГТУ, 2006. С. 149.

Информация об авторах

Суворов Александр Петрович - старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alex_diz@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-3572>
Алешина Анастасия Эдуардовна - старший лаборант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: aleshina.1992.ru@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8600-3434>
Сафонова Татьяна Петровна - преподаватель высшей квалификационной категории, Воронежский индустриальный колледж (394038, Россия, г. Воронеж, ул. Космонавтов, 23), e-mail: eduard.safonov.1976@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8731-8155>

Поступила 09.03.2021; принята к публикации 18.06.2021

APPLICATION OF MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN AUTOMATION OF MACHINERY PRODUCTION

A.P. Suvorov¹, A.E. Alyeshina¹, T.P. Safonova²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh Industrial College, Voronezh, Russia

Abstract: the relevance of the study is justified by the expansion of the functionality of modern automated design systems, which include not only automation tools for most of the product life cycle but also the use of cloud technologies, which significantly expands the possibilities of their application. In this regard, the article is aimed at disclosing the features of the use of modern means of automated design and additive technologies for the manufacture of complex parts or structural elements in a single and pilot production, when it is necessary to conduct theoretical and experimental research based on the design and development of a complex-profile electrode-tool for electrical processing techniques. The article presents a method for designing and producing a tool-electrode for electrical processing methods, followed by the application of a conductive coating, using modern computer-aided design systems in experimental design and unit production. The materials of the article are of practical value for enterprises of the machine-building complex since they allow making changes in the design technolo-

gy and manufacturing of complex parts or structural elements. Through the use of modern computer-aided design systems and additive technologies the cost reduces and the variability of its application increases

Key words: computer-aided design systems, additive technologies, electrode-tool, electrochemical processing

References

1. Suvorov A.P. “The use of modern information technologies in the development of a complex-profile electrode-tool”, *Modeling, Optimization and Information Technologies (Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii)*, 2017, no. 4, pp. 11.
2. Suvorov A.P., Kuzovkin A.V. “The use of additive technologies in the production of shaped surfaces”, *Bulletin of Rybinsk State Aviation Technological Academy (Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Solov'yeva)*, 201, no. 2, pp. 9-15.
3. Suvorov A.P., Kuzovkin A.V. “Parametric design of an electrode-tool for electrical processing using the ilogic module”, *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, no. 3, pp. 105-109.
4. Smolentsev V.P. “Electrophysical and electrochemical methods of material processing” (“Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov”), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, vol. 1, 247 p.
5. Nemilov E.F. “Handbook of electroerosive processing of materials” (“Spravochnik po elektroerozionnoy obrabotke materialov”), Leningrad, Mashinostroenie, 1989.
6. Suvorov A.P., Kretinin A.V. and Kuzovkin A.V. “Methods of manufacturing a complex-profile electrode-tool using rapid prototyping technology”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, no. 2, pp. 11-14.
7. Suvorov A.P. “Design combined electrode-tool for electric methods of processing by means of its parameterization of CAD”, *Proc. of the Int. Sci. and Practical Conf.: Infographics and Information Design: Data Visualization (Infografika i informatsionnyy dizayn: vizualizatsiya dannykh v nauke: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Omsk, 2017, pp. 148-152.
8. Smolentsev V.P., Kuzovkin A.V., Potashnikov M.G. “Designing technological equipment for electrical processing methods” (“Proektirovanie tekhnologicheskoy osnastki dlya elektricheskikh metodov obrabotki”), Voronezh, VSTU, 2006, 149 p.

Submitted 09.03.2021; revised 18.06.2021

Information about the authors

Aleksandr P. Suvorov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: alex_diz@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-3572>

Anastasiya E. Aleyschina, Senior Laboratory Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: aleshina.1992.ru@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8600-3434>

Tat'yana P. Safonova, Teacher of the highest qualification category, Voronezh Industrial College (23 Kosmonavtov str., Voronezh 394038, Russia), e-mail: eduard.safonov.1976@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8731-8155>

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ЧАСТИ ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.И. Максименков¹, М.В. Молод¹, В.И. Федосеев²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Филиал ПАО «Корпорация «Иркут», г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена информация по формообразованию панелей на гибочно-растяжных прессах, позволяющих получать детали требуемого качества. Проанализированы вопросы формообразования осесимметричных оболочек в печах УВН, которые применяются для кожухов шумоглушения турбореактивных двигателей. Приведена технология изготовления металлических звукопоглощающих конструкций (ЗПК) горячей части двигателя. Приведены материалы, применяемые для изготовления ЗПК. Приведена оправа для калибровки осесимметричных оболочек. Выполненный расчёт увеличения диаметра оболочки при нагреве в печи УВН показал, что эта величина определяется коэффициентом линейного расширения материала оправы. Определены деформации и давление, возникающие в процессе формообразования. Приведено сравнение возникающих давлений на сотовом заполнителе с механическими испытаниями образцов и определены предельные напряжения сжатия. Особенность данного метода – малая величина увеличения диаметра оболочки при нагреве. Для расширения технологических возможностей процесса калибровки разработано устройство, позволяющее увеличивать степень деформации при формообразовании оболочки. Приведена конструкция устройства, позволяющая осуществлять процесс формообразования оболочек за счёт колец, выполненных из стали и титана. При этом за счёт различных коэффициентов линейного расширения перемещение дисков передается рычагам и разжимным секторам, контактирующим с оболочкой. Данная конструкция позволяет получать заданную степень деформации для оболочки, меняя геометрические размеры элементов устройства. Разработана методика проектирования устройства. Приведён пример расчёта перемещений рычагов устройства

Ключевые слова: оболочка, оправа, деформация, коэффициент линейного расширения, устройство

Введение

Ужесточение международного стандарта ИКАО ставит сложные задачи перед разработчиками турбореактивных двигателей. Одно из направлений, во многом определяющее конкурентоспособность двигателя, – это его акустические характеристики. Шум двигателя и самолета в целом на режимах взлёта и посадки является определяющим в оценке качества изделия.

В статье рассмотрены вопросы технологий изготовления ЗПК, завершающим этапом которых является получение осесимметричной оболочки.

Вопросы формообразования обшивок и панелей ЗПК рассмотрены в работах [1, 3, 6].

Процессы формообразования осесимметричных оболочек представляют интерес для разработки новых двигателей.

Постановка задачи

Рассмотреть процессы формообразования панелей на гибочно-растяжных прессах.

Провести анализ способов калибровки осесимметричных оболочек.

Разработать способ калибровки осесимметричных оболочек, позволяющий получать заданную степень деформации.

Формообразование панелей на гибочно-растяжных прессах

Исследование процесса формообразования панелей ЗПК на прессах ГРП 160/1200 и FEKD с ЧПУ представлено в работах [2,4,5,7].

Основные материалы, применяемые для изготовления несущих слоёв сотовых панелей и сотового заполнителя, – нержавеющие стали (12X18H10T) и титановые сплавы (ОТ4-1 и ВТ1-0).

Комплекс проведённых исследований однослойных и двухслойных панелей позволил выявить зависимости остаточного радиуса кривизны от толщин несущих слоёв (рис. 1а, 1б), высоты заполнителя (рис. 1в), положения срединного несущего слоя при формообразовании двухслойной панели (рис. 1г). Приведённые зависимости позволяют разработчикам оценивать технологичность панелей на стадии их проектирования, прогнозировать их качество.

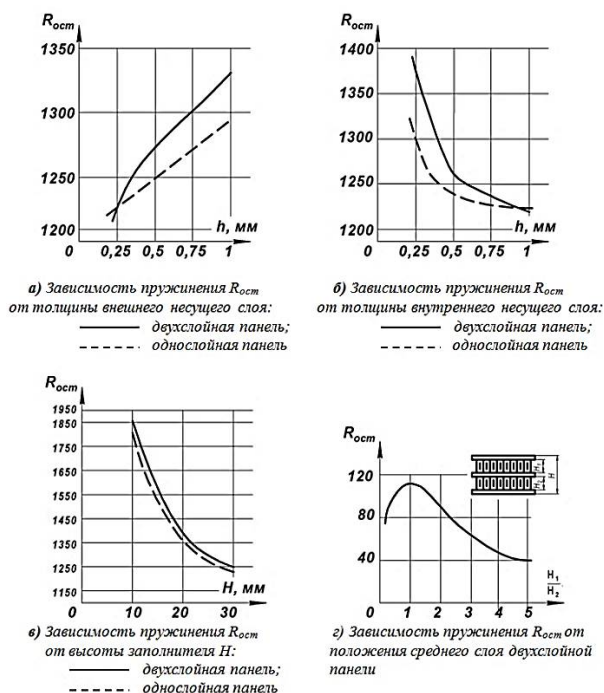


Рис. 1. Графики зависимостей, полученные в результате испытаний

Способы калибровки осесимметричных оболочек

Известен способ формообразования оболочек с растяжением разжимными пуансонами в холодном состоянии (рис. 2), когда заготовка растягивается секторами пуансона в радиальном направлении до заданной степени деформации [8].

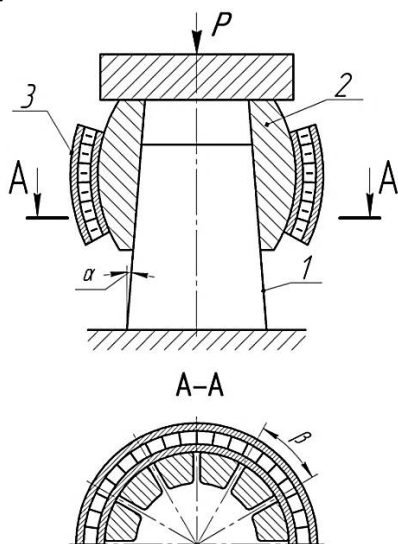


Рис. 2. Формообразование оболочки разжимными пуансонами: 1 - конус; 2 - разжимной пуансон; 3 - заготовка

Если применить этот способ к калибровке оболочек ЗПК, то видим, что к наружной обо-

лочке прикладываемое усилие передается через сотовый заполнитель (рис. 3). Основными критериями, ограничивающими данный процесс формообразования, являются наличие отпечатков на внутренней поверхности оболочки, а также возможное превышение допустимых напряжений сжатия сотового заполнителя, определяемые при механических испытаниях образцов. То есть необходимо выполнение условия согласно зависимости (1):

$$q \leq [\sigma_{сж}], \quad (1)$$

где $[\sigma_{сж}]$ - допустимые напряжения сжатия сотового заполнителя, $\text{кг}/\text{мм}^2$;

q - давление разжимных пуансонов на внутреннюю обшивку оболочки, $\text{кг}/\text{мм}^2$; определяется по формуле (2):

$$q = \sigma_1 \cdot h_1 / R_1, \quad (2)$$

где σ_1 - радиальные напряжения внутренней и наружной оболочек, $\text{кг}/\text{мм}^2$;

h_1 - толщина внутренней и наружной оболочек, мм;

R_1 - радиус внутренней оболочки, мм.

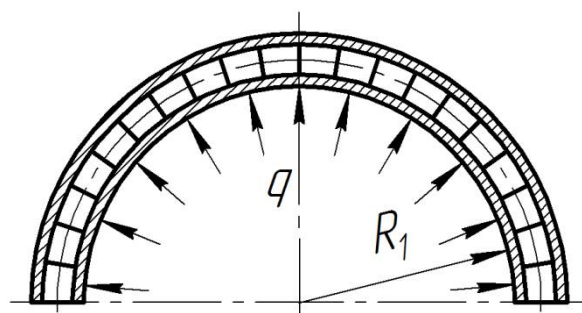


Рис. 3. Схема распределения давления по обшивке оболочки

Учитывая, что осесимметричная оболочка состоит из отдельных секторов панелей, соединенных сваркой и требующей последующей термообработки, преимущество по калибровке получают процессы формообразования с нагревом в печах УВН.

Формообразование оболочек с нагревом в печах УВН

Проведенный анализ способов формообразования оболочек показал их преимущества и недостатки и выявил необходимость совмещения процесса деформирования оболочки с ее отжигом.

Проводимые исследования по калибровке осесимметричных оболочек в холодном состоянии выявили один из факторов – продольные сварные швы в зоне соединения секторов и

коробление, которое трудно устранить при формообразовании ранее рассмотренными методами.

Поэтому предлагается процесс калибровки оболочек с нагревом (рис. 5). При этом усилие калибровки создается за счет температурного расширения оснастки.

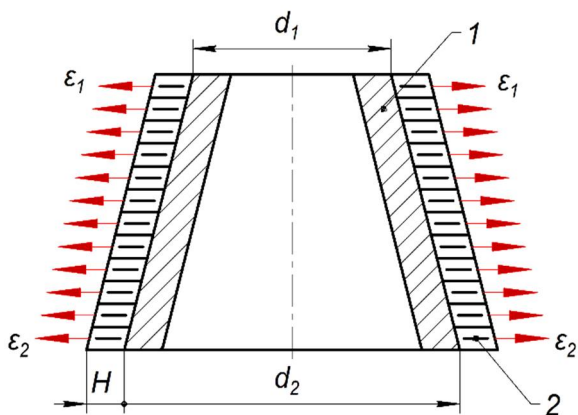


Рис. 4. Схема калибровки: 1 - оправа; 2 – осесимметричная оболочка

Процесс калибровки осуществляется в вакуумной печи УВН при температуре 850°C. При нагреве оправы происходит увеличение ее диаметра Δd, которое определяется по формуле (3):

$$\Delta d = d \cdot \alpha \cdot (T - T_0), \quad (3)$$

где d – диаметр оправы, мм;
 α – коэффициент линейного расширения, для стали равен $19,4 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$;
 T – температура печи, °C ;
 T₀ – начальная температура, °C .

Деформации оболочки ε₁, ε₂ при нагреве определяются по зависимости (4) и (5):

$$\varepsilon_1 = \frac{d_{1к} - d_{1н}}{d_{1н}}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{d_{2к} - d_{2н}}{d_{2н}}, \quad (5)$$

где d_{1н}, d_{2н} – диаметр верхней и нижней частей оправы при температуре 20°C;

d_{1к}, d_{2к} – диаметр верхней и нижней частей оправы при температуре 850°C;

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов и входные данные

Материал	d ₁ , мм	d ₂ , мм	α × 10 ⁻⁶ 1/°C	Δd ₁ , мм	Δd ₂ , мм	ε ₁ , %	ε ₂ , %
12X18H10T	700	1000	19,4	11,2	16,1	1,6	1,6

Необходимое давление по сечениям осесимметричной оболочки имеет вид (формула 6):

$$q = \frac{\sigma_s}{R} \cdot h, \quad (6)$$

где σ_s – предел текучести обшивок, кг/мм²;
 R – радиус сечения оболочек, мм;
 h – толщина обшивок.

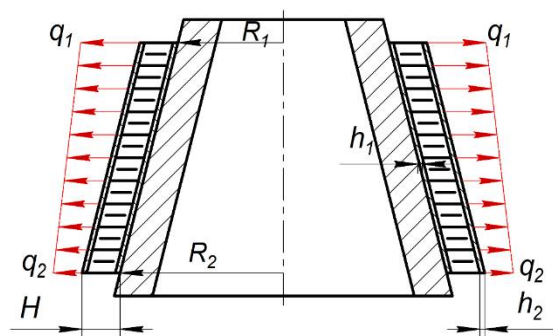


Рис. 5. Схема распределения давления по высоте оболочки

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов

Материал	h ₁ , мм	h ₂ , мм	σ _{s1} , кг/мм ²	σ _{s1} , кг/мм ²	H, мм	R ₁ , мм	R ₂ , мм	q ₁ , кг/мм ²	q ₂ , кг/мм ²	[σ _{сж}], кг/мм ²
12X18H10T	0,5	0,5	12,7	12,7	20	350	520	0,07	0,05	0,2

При калибровке оболочки с нагревом выполняется условие $q_1 \leq [\sigma_{сж}]$.

Применение оправы для калибровки оболочек обеспечивает увеличение диаметра оправы, зависящего от коэффициента линейного расширения.

Методика проектирования устройства для калибровки оболочек

Разработана методика проектирования устройства.

На рис. 6, 7, 8 представлены схемы устройства, позволяющие определять величину перемещения различных секторов с учетом геометрических размеров устройства, кинематики перемещения элементов устройства с различным коэффициентом линейного расширения при нагревании печи.

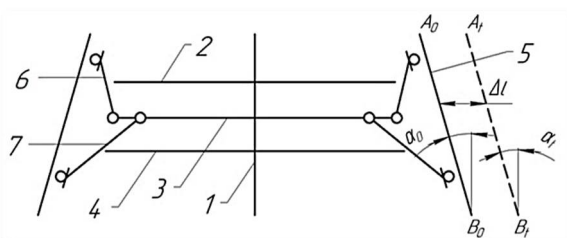


Рис. 6. Схема устройства для калибровки:
1 – стойка; 2, 4 – стальные кольца; 3 – титановое кольцо;
5 – разжимные сектора; 6, 7 – рычаги;
A0-B0 – начальное положение разжимных секторов;
A1-B1 – конечное положение разжимных секторов

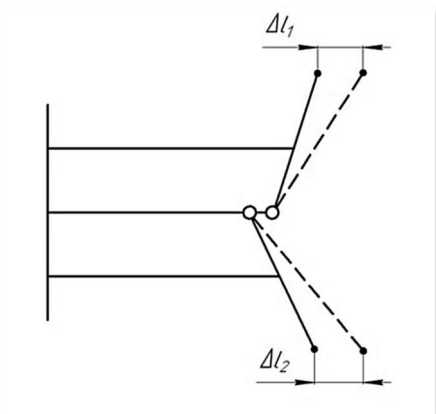


Рис. 7. Схема устройства для определения параметров процесса

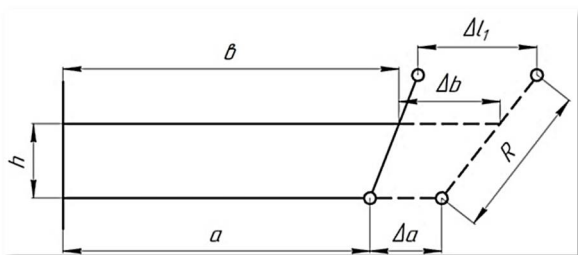


Рис. 8. Схема устройства для определения параметров процесса

Перемещение концов рычагов определяется по полученной зависимости (7):

$$\Delta l = \Delta a + R \left(\frac{b - a + \Delta b - \Delta a}{\sqrt{(b - a + \Delta b - \Delta a)^2 + h^2}} - \frac{b - a}{\sqrt{(b - a)^2 + h^2}} \right), \quad (7)$$

где a - радиус среднего кольца до места шарнирного крепления рычага, мм;

b - радиус верхнего кольца до места касания рычага, мм;

R - длина рычага, мм;

Δa - увеличение радиуса среднего кольца при нагреве, мм;

Δb - увеличение радиуса верхнего кольца при нагреве, мм;

H - расстояние между средним и верхним кольцом, мм.

Пример расчёта перемещений верхней части рычага устройства приведён в табл. 3.

Таблица 3

Параметры процесса калибровки

Материал	a, мм	b, мм	R, мм	h, мм	$\alpha \times 10^{-6}, 1/^\circ\text{C}$	Δa, мм	Δb, мм	Δl ₁ , мм
12X18H10T	472	485	182	39	19,4	3,3	7,8	19,6
OT4-1					8,15			

Из приведённых расчётов видно, что увеличение радиуса оболочки при калибровке составляет 19,6 мм.

Аналогично определяется перемещение нижней части рычагов устройства.

Приведённая конструкция устройства для калибровки оболочек позволяет значительно расширить технологические возможности процесса формообразования, осуществляя перформовку из цилиндра в конус, а также формообразование оболочек двойной кривизны. Проведённые экспериментальные исследования подтвердили возможность появления оболочек требуемого качества.

Выводы

1. Комплекс проведенных исследований по формообразованию сотовых панелей позволил прогнозировать качество получаемых панелей при их проектировании с учетом их конструктивных параметров.

2. Разработана конструкция устройства для калибровки оболочек с повышенными технологическими возможностями, расширяющие технологии формообразования получаемых деталей.

3. Рассмотрен процесс калибровки осесимметричных оболочек, позволяющий с учетом геометрии деталей, их материалов, кинематических особенностей устройства, получать детали требуемого качества.

4. Разработана методика проектирования устройства для калибровки оболочек, позволяющая осуществлять процесс формообразования оболочек с учетом заданных геометрических размеров.

Литература

1. Одинг С.С. Управление процессом формообразования обшивок двойной кривизны на обтяжном оборудовании с программным управлением // Известия вузов. Авиационная техника. 1987. С. 39-43.

2. Исследование кинематической схемы последовательной обтяжки оболочек двояковыпуклой формы на обтяжном прессе FEKD / В.А. Михеев, Ф.В. Гречников, С.Г. Дементьев, В.П. Самохвалов, Д.В. Савин, С.В. Сурудин // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 6. С. 172-179.

3. Пат. 24596801 Российская Федерация. Способ обтяжки листовых материалов / Максименков В.И., Молод М.В., Ляхова Н.Е., Решетникова Е.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет». опуб. 27.08.2013, Бюл. № 24. 1 с.

4. Одинг С.С., Молод М.В. Повышение технологических возможностей процесса обтяжки на прессах с ЧПУ // Прогрессивные технологии авиационного и машиностроительного производств. Аэродинамика, механика и технология авиастроения. Воронеж: ВГТУ, 2000. С. 18-22.

5. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голенков, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь, С.Ю. Радченко. М.: Машиностроение, 2004. С. 464.

6. Молод М.В. Разработка универсального пуансона // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 16. № 1. С. 55-57.

7. Молод М.В., Максименков В.И., Федосеев В.И. Формообразующие технологии для изготовления кожухов шумоглушения турбореактивного двигателя // Вестник СГАУ. 2018. Т. 17. № 3. С. 167-174.

8. Пат. 1208661 Российская Федерация. Устройство для калибровки полых деталей термофиксацией / Максименков В.И. Гальченко Б.В., Вязьмикина Н.И., Писаренко В.Е., Токарев А.С. опуб. 11.03.1984.

Поступила 03.03.2021; принята к публикации 18.06.2021

Информация об авторах

Максименков Владимир Иванович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Молод Марина Владиславовна - д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: molodmv@yandex.ru

Федосеев Владислав Игоревич – ведущий инженер-конструктор, филиал ПАО «Корпорация «Иркут» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: vladislav.f@inbox.ru

FORMATION OF AXISYMMETRIC SHELLS FOR THE HOT PART OF A TURBOJET ENGINE

V.I. Maksimenkov¹, M.V. Molod¹, V.I. Fedoseev²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Branch of "Corporation "Irkut", Voronezh, Russia

Abstract: the article considers the information on the shaping of panels on stretch-bending presses, allowing to obtain parts of the required quality. We analyzed the issues of the formation of axisymmetric shells in UHN furnaces, which are used for noise damping casings of turbojet engines. We present the technology of production of metal sound-absorbing structures (SAD) of the hot part of the engine. We give the materials used for the manufacture of SAD. We show the frame for the calibration of axisymmetric shells. The performed calculation of the increase in the diameter of the shell when heated in the UHN furnace showed that this value is determined by the coefficient of linear expansion of the frame material. We determined deformations and pressure arising in the process of shaping. We give comparison of the arising pressures on the honeycomb filler with mechanical tests of samples and determined the limiting compressive stresses. A feature of this method is a small increase in the diameter of the shell during heating. To expand the technological capabilities of the calibration process, we developed a device that makes it possible to increase the degree of deformation during the shaping of the shell. We present the design of the device, which allows the process of forming shells at the expense of rings made of steel and titanium. At the same time, due to various coefficients of linear expansion, the movement of the disks is transferred to the levers and expanding sectors in contact with the shell. This design makes it possible to obtain a given degree of deformation for the shell by changing the geometric

dimensions of the device elements. We developed a methodology for designing a device. We give an example of calculating the displacement of the device levers

Key words: shell, strain, coefficient of linear expansion, device

References

1. Oding S.S. "Process operation of forming double curvature sheeting on the tight press with numerical control", *News of Higher Institutions. Aircraft Engineering (Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika)*, Kazan', 1987, pp.39-43.
2. Mikheev V.A., Grechnikov F.V., Dement'ev S.G., Samokhvalov V.P., Savin D.V., Surudin S.V. "The study of the kinematic scheme of the sequential covering biconvex shape shells on the press FEKD", *News of Samara Scientific Center of RAS (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN)*, 2014, vol. 16, no. 6, pp.172-179.
3. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Lyakhova N.E., Reshetnikova E.V. "Method of covering sheet materials" ("Sposob obtyazhki listovykh materialov"), patent 24596801 pub. 27.08.2013, bull. no. 24, 1 p.
4. Oding S.S., Molod M.V. "Increase of stretch forming process technology options by forming press with numerical control", *Progressive Technologies of Aviation and Engineering Manufacture. Aerodynamics, Mechanics and Aviation Technology (Progressivnye tekhnologii aviatsionnogo i mashinostroitel'nogo proizvodstv. Aerodinamika, mekhanika i tekhnologiya aviastroeniya)*, Voronezh State Technical University, 2000, pp.18-22.
5. Golenkov V.A., Dmitriev A.M., Kukhar V.D., Radchenko S.Yu. "Special technological processes and equipment of processing by pressure" ("Spetsialnye tehnologicheskie protsessy i oborudovanie obrabotki davleniem"), Moscow, Mashinostroenie, 2004, 464 p.
6. Molod M.V. "Development of a universal poinson", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 12, no. 1, pp.55-57.
7. Molod M.V., Maksimenkov V.I., Fedoseev V.I. "Forming technologies for making acoustic covers of TJE", *Bulletin of SSAU (Vestnik of SGAU)*, 2018, vol. 17, no. 3, pp.167-174.
8. Maksimenkov V.I., Galchenko B.V., Vyaz'mikina N.I., Pisarenko V.E., Tokarev A.S. "The device for calibration of hollow parts by thermal fixation" ("Ustroystvo dlya kalibrovki polykh detaley termofiksatsiy"), patent 1208661 publ. 11.03.1984.

Submitted 03.03.2021; revised 18.06.2021

Information about the authors

Vladimir I. Maksimenkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru
Marina V. Molod, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: molodmv@yandex.ru
Vladislav I. Fedoseev, Lead Engineering Designer, Public Company «Corporation «Irkut» (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: vladislav.f@inbox.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СВЕРЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ УПРУГОДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

В.В. Куц, А.С. Бышкин, М.С. Разумов

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация: сверление отверстий - одна из распространенных операций при изготовлении деталей. Вследствие этого повышение эффективности данного процесса является актуальной задачей. Для повышения эффективности процесса сверления на базе Юго-Западного университета был разработан способ сверления в предварительно напряженно-деформированном материале заготовки, который подвергают упругой деформации нагрузкой, не превышающей предела пропорциональности материала заготовки. После снятия нагрузки размеры заготовки остаются прежними. Было показано, что при таком способе сверления наблюдается уменьшение осевой составляющей силы резания от 20 до 30%. Причиной этого является то, что в зону резания, а именно в зону первичных деформаций, материал заготовки будет поступать, находясь в предварительно деформированном состоянии, которое способствует насыщению кристаллической решетки обрабатываемого металла энергией. В рамках представленной работы было выполнено моделирование процесса сверления заготовок из цветных сплавов в предварительно упругодеформированном состоянии. Особый интерес при раскрытии механизма этого явления представляют исследование и описание изменения зоны предварительного упругодеформированного состояния обрабатываемого материала на различной глубине сверления. Исследование было выполнено в среде конечно-элементного анализа DEFORM-3D, которое показало, что упругодеформированное состояние обрабатываемого материала будет обеспечиваться в зоне резания на протяжении всего времени обработки

Ключевые слова: сверление, предел упругости, устройство, деформации, заготовка, разрушение, предел пропорциональности, физико-механические свойства, компьютерное моделирование, метод конечных элементов

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90108

Введение

Операция сверления получила широкое распространение в отечественном машиностроении. Сверление - традиционный метод получения отверстий. Однако стоит отметить, что сверление отверстий малого диаметра (до 5 мм) накладывает определённые технологические ограничения, связанные с малой жесткостью инструмента, низкой прочностью осевого инструмента малого диаметра, тяжелыми условиями при выводе стружки из зоны резания. Вследствие чего, пока не будут решены данные проблемы, попытки интенсификации данного процесса будут актуальны для отечественного машиностроения с целью создания высокоэффективных конкурентоспособных производств, как на внутреннем рынке, так и на внешнем.

Для достижения данной цели предлагаются различные технологические приемы, позволяющие решить описанные выше проблемы при сверлении отверстий малого диаметра. Например, для обеспечения благоприятных условий

сверления цветных сплавов могут быть применены: методы вибрационного сверления с введением дополнительных колебаний инструмента; предварительный нагрев заготовки в зоне обработки с целью изменить физико-механические свойства обрабатываемого материала; обеспечение подачи СОЖ в зону обработки и пр. [1-13].

Однако применение данных подходов при сверлении отверстий малого диаметра требует разработки и создания специальных приспособлений, имеющих достаточно сложное конструктивное исполнение [13-23].

Также для интенсификации процессов резания, в основном при точении, хорошо зарекомендовал себя способ опережающих пластических деформаций, который в применении к сверлению обладает тем же недостатком. Достаточно сложно конструктивно реализовать предварительные пластические деформации в закрытой зоне.

В результате данного анализа было предложено нагрузить заготовку перед процессом сверления, сформировав тем самым предварительное упругодеформированное состояние

материала заготовки в области сверления отверстия. В работах [23-29] обсуждалась идея создания кондуктора, который подвергает заготовку упругой деформации, при этом нагрузка не превышает предела пропорциональности материала заготовки, и после снятия нагрузки размеры заготовки оставались прежними. Также в данных работах приводились результаты экспериментальных исследований процесса

сверления заготовок из алюминиевых и медных сплавов, в материале которых с применением данного кондуктора создавалась зона упругодеформированного состояния. Было показано, что при таком способе сверления отверстий малого диаметра (в частности 3 мм) наблюдается уменьшение осевой составляющей силы резания от 20 до 30% (рис. 1, 2).

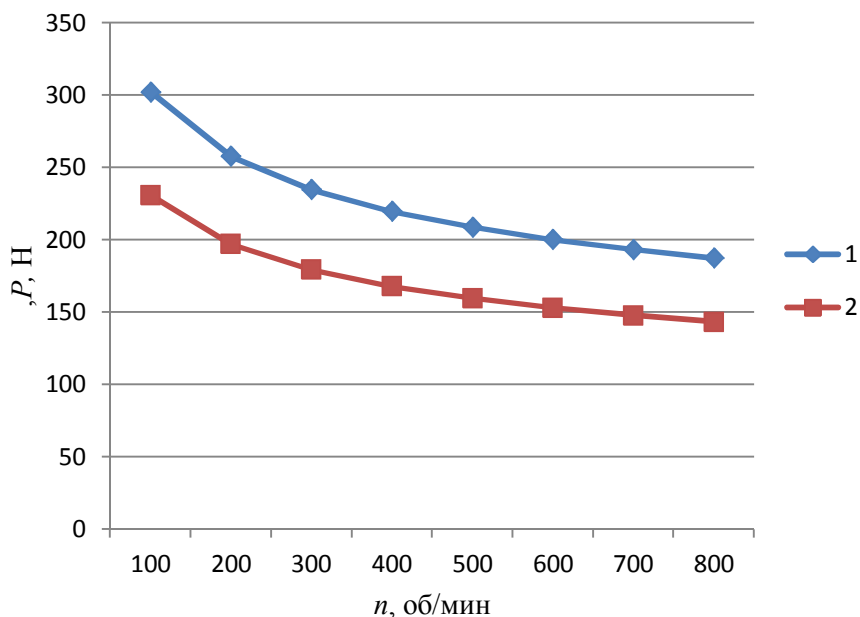


Рис. 1. Зависимость осевой силы от частоты вращения при обычном сверлении заготовок из медного сплава (1) и сверлении в предварительно упругодеформированном состоянии (2)

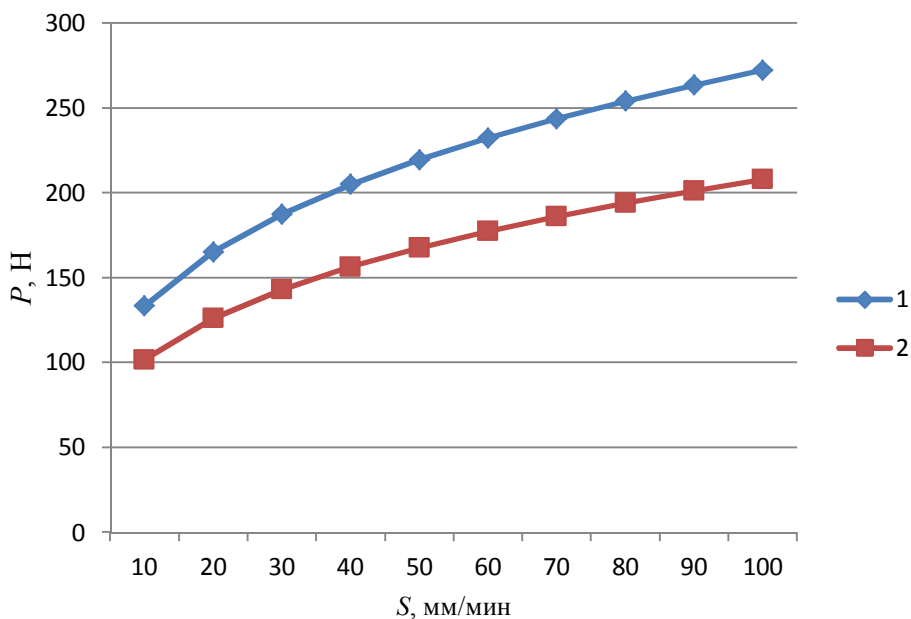


Рис. 2. Зависимость осевой силы от минутной подачи при обычном сверлении заготовок из медного сплава (1) и сверлении в предварительно упругодеформированном состоянии (2)

Сверление проводилось спиральным сверлом стандартной заточки диаметром 3 мм при подаче $S=100$ мм/мин (см. рис. 2) и при частоте вращения шпинделя $n=800$ об/мин (см. рис. 3).

В зону резания, а именно в зону первичных деформаций, материал заготовки будет поступать, находясь в предварительно деформированном состоянии, которое способствует насыщению кристаллической решетки обрабатываемого металла энергией [30], при которой она будет близка к выходу из состояния равновесия, в результате чего потребуется совершить меньше работы на доведение металла до разрушения и, соответственно, приводит к снижению силы реакции на передней поверхности инструмента и поверхности перемычки.

Постановка задачи

Особый интерес при раскрытии механизма этого явления представляют исследование и описание изменения зоны предварительного

упругодеформированного состояния обрабатываемого материала на различной глубине сверления без учета напряжений, создаваемых сверлом в процессе работы. Данное исследование было выполнено на основе моделирования процесса сверления сквозного отверстия диаметром 3 мм в среде конечно-элементного анализа DEFORM-3D. В качестве материала заготовки использовался алюминиевый сплав AL-3003 (АМц по ГОСТ 4784-97), наружный диаметр заготовки и её высоту принимали равным 10 мм. Деформирование заготовки осуществлялось путем перемещения вниз верхней кондукторной плиты на величину 0,2 мм.

Результаты

На рис. 3 показано распределение линий максимальных значений главных напряжений (МПа) после создания в материале заготовки предварительного упругодеформированного состояния.

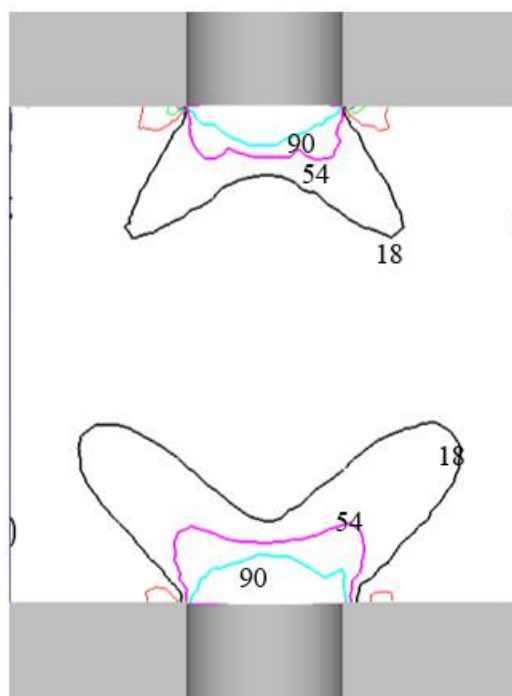


Рис. 3. Распределение в заготовке линий максимальных значений главного напряжения (МПа) в начальный момент времени

Из данного рисунка видно, что наибольшие значения максимальных главных напряжений (>90 МПа) достигаются в заготовке в области расположения отверстия кондуктора на глубине до 0,5 мм, где будет происходить контакт сверла с заготовкой при его врезании и последующей работы, а также с противоположной стороны заготовки в месте будущего выхода сверла. Таким образом, можно утвер-

ждать, что деформированием заготовки кондуктором с отверстием позволяет создать на начальном этапе в зоне обработки предварительное упругодеформированное состояние обрабатываемого материала.

На рис. 2 показано распределение в заготовке линий максимальных значений главных напряжений (МПа) на глубине сверления: 1,5; 5; 8 и 9,5 мм.

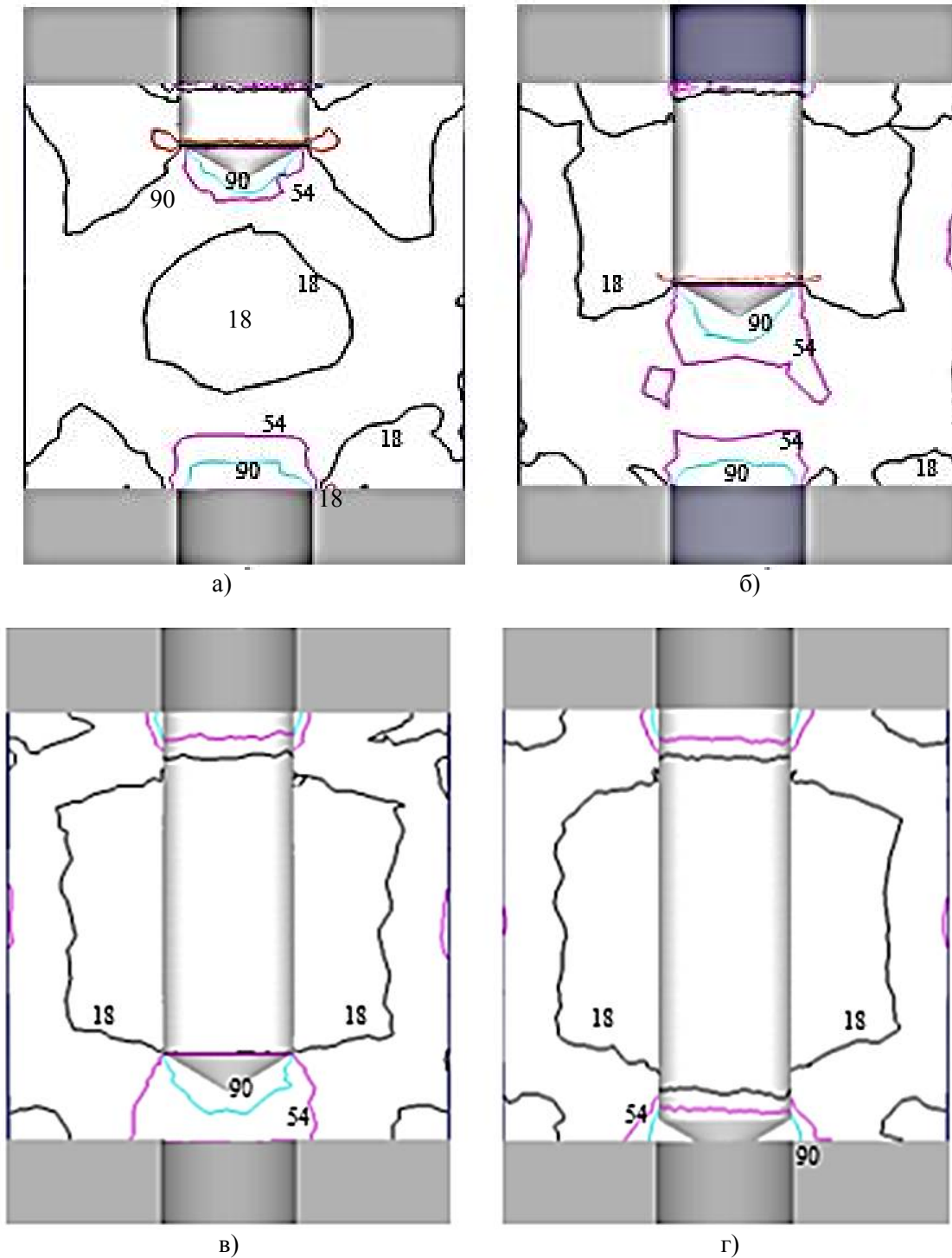


Рис. 4. Распределение в заготовке линий максимальных значений главного напряжения (МПа) в процессе сверления на глубине: а) 1,5 мм; б) 5 мм; в) 8 мм; г) 9,5 мм

Из рисунков видно, что в процессе продвижения сверла в глубь заготовки зона наибольших значений максимального главного напряжения с глубиной до 0,5 мм будет также перемещаться в глубь материала и располагаться за поверхностью дна формируемого отверстия. Это связано, прежде всего, с тем, что дно отверстия, имеющее коническую форму,

выступает в качестве концентратора напряжений.

На рис. 5 показано изменение максимальных значений главного напряжения в процессе сверления на точках поверхности дна отверстия, расположенных на разных расстояниях от оси.

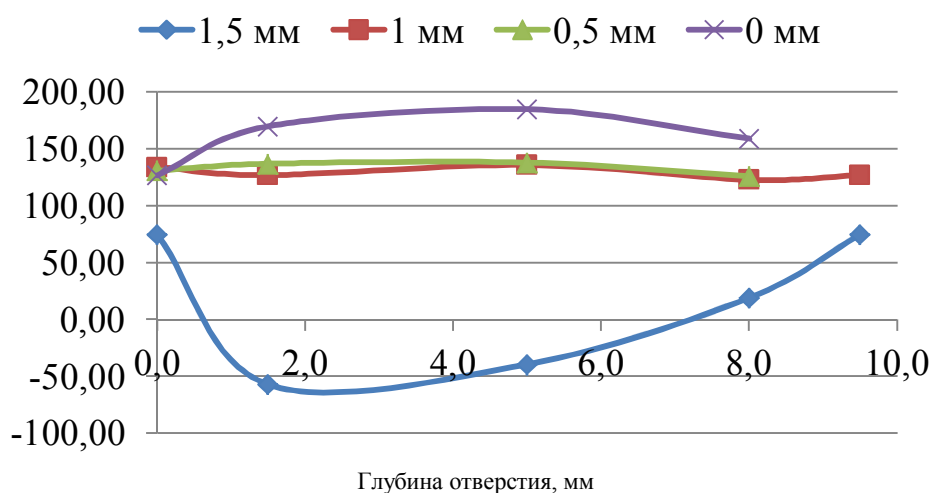


Рис. 5. Изменение максимальных значений главного напряжения (МПа) в процессе сверления на точках поверхности дна отверстия, расположенных на разных расстояниях от оси

Из рис. 5 видно, что вдоль оси обрабатываемого отверстия, где будет происходить контакт перемычки сверла с обрабатываемым материалом, формируется зона наибольших максимальных значений главного напряжения (≈ 180 МПа) практически на всем протяжении процесса сверления. Исключение составляет начальный момент времени, где эти значения не отличаются от значений в точках поверхности дна отверстия, расположенных на разных расстояниях от оси (≈ 127 МПа).

В точках, расположенных вблизи поверхности формируемого отверстия, максимальные значения главного напряжения имеют наименьшие значения и в процессе увеличения глубины отверстия меняют значения в пределах от 75 до -60 МПа.

Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что при сверлении отверстий малого диаметра (до 5 мм) упруго-деформированное состояние обрабатываемого материала будет сохраняться в зоне резания на протяжении всего времени обработки, обеспечивая уменьшение осевой составляющей силы резания при сверлении.

Литература

1. Приспособление для сверления отверстий с наложением вибраций на заготовку / М.С. Разумов, М.К. Загорин, М.Ш. Гагиев, А.С. Бышкин // *Современные материалы, техника и технология: сб. науч. ст. 8-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск: Издательство: ЗАО "Университетская книга", 2018. С. 347-352.*
2. Виноградова Н.В. Теоретическое исследование величины остаточных напряжений от структурно-фазовых превращений в поверхностном слое деталей после механической обработки // *Актуальные вопросы техники и*

технологии: сб. докл. междунар. науч. заоч. конф. / под ред. А.В. Горбенко, С.В. Довженко. Липецк: Издат. центр «Де-факто», 2010. Т. 1. С. 111-115.

3. Determining the geometric parameters of a sheared layer in drilling of nonferrous metals and alloys with the use of axial vibrations / S.G. Emel'yanov, V.V. Sidorova, V.V. Ponomarev, M.S. Razumov // *Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Т. 52. № 11-12. С. 796-800.*

4. Определение геометрических параметров срезаемого слоя при сверлении цветных металлов и сплавов с наложением осевых вибраций/ С.Г. Емельянов, В.В. Сидорова, В.В. Пономарев, М.С. Разумов // *Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 11. С. 45-47.*

5. Сидорова В.В., Разумов М.С. Устройство для вибрационного сверления // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 4 (306). С. 51-54.*

6. Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Расчет силовых параметров вибрационного резания // *Будущее машиностроения России: сб. тр. VII Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 10-11.*

7. Патент на полезную модель RU 147317 U1, 10.11.2014. Устройство для вибрационного сверления/ Сидорова В.В., Разумов М.С., Понкратов П.А. Заявка № 2014120738/02 от 22.05.2014.

8. Razumov M.S., Sidorova V.V., Grechukhin A.N. Automated control of process conditions during drilling with imposition of vibrations // *Metallurgical and Mining Industry. 2014. Т. 6. № 5. С. 19-23.*

9. Сидорова В.В., Разумов М.С. Повышение производительности вибрационного сверления отверстий малого диаметра в заготовках из титановых сплавов // *Интеграция науки и практики как условие экономического роста: VII Междунар. науч.-практ. конф. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2014. С. 11-12.*

10. Выявление эмпирических зависимостей конструктивных параметров устройства для наложения вибраций на осевое усилие при сверлении отверстий малого диаметра / С.Г. Емельянов, М.С. Разумов, А.Н. Гречухин, В.В. Сидорова // *Фундаментальные исследования. 2015. № 10-3. С. 484-488.*

11. Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Определение зависимости силы постоянных магнитов от расстояния при вибрационном резании // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. тр. 5-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск: Издательство: ЗАО "Университетская книга", 2015. С. 284-287.
12. Анализ зависимостей параметров постоянных магнитов и их установки на усилие вибрации при сверлении с наложением осевых колебаний / В.В. Сидорова, М.С. Разумов, А.Н. Гречухин, С.Г. Емельянов // Будущее машиностроения России: сб. докл. Восьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. М.: Издательство Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2015. С. 34-37.
13. Сидорова В.В., Разумов М.С., Гречухин А.Н. Автоматизированное средство управления технологическими параметрами при сверлении с наложением вибраций // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. науч. тр. I Междунар. науч. конф. молодых ученых. Новосибирск: Издательство Новосибирский государственный технический университет, 2014. С. 154-156.
14. Патент на полезную модель RU 179403 U1, 14.05.2018. Устройство для сверления с наложением осевых вибраций / Сидорова В.В., Пономарев В.В., Разумов М.С. Заявка № 2017107102 от 03.03.2017.
15. Влияние опережающего пластического деформирования на износ инструмента и качество поверхностного слоя при обработке аустенитных сталей / Ю.Н. Полянчиков и др. // Известия ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». 2008. № 9. С. 35-37.
16. Игнатов С.Н., Карпов А.В., Распопин А.П. Оценка эффективности лезвийной обработки с использованием безразмерного энергетического критерия // СТИН. 2004. № 12. С. 23-25.
17. Ингеманссон А.Р., Щедриков С.О., Полянчиков Ю.Н. Улучшение обрабатываемости нержавеющей стали при использовании резания с опережающим пластическим деформированием // XV региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области: тез. докл. Волгоград: ВолгГТУ, 2011. С. 76-77.
18. Ингеманссон А.Р. Повышение эффективности точения труднообрабатываемых сталей ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов с использованием опережающего пластического деформирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Волгоград, 2012. 209 с.
19. Математическая модель формирования шероховатости обработанной поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием коррозионно-стойких сталей / А.Р. Ингеманссон и др. // Металлообработка. 2012. № 1. С. 11-15
20. Норченко П.А., Ингеманссон А.Р., Полянчиков Ю.Н. Метод резания аустенитных сталей с опережающим пластическим деформированием и его преимущества с точки зрения кристаллической теории строения металлов // XIII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области: тез. докл. Волгоград: ВолгГТУ, 2009. С. 74-77.
21. Норченко П.А. Повышение эффективности процесса резания нержавеющей стали аустенитного класса с опережающим пластическим деформированием: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Волгоград, 2010. 127 с.
22. Норченко П.А., Ингеманссон А.Р., Полянчиков Ю.Н. Улучшение шероховатости обработанной поверхности при резании нержавеющей стали 12X18H10T с опережающим пластическим деформированием // XIV региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области: тез. докл. Волгоград: ВолгГТУ, 2010. С. 63-64.
23. А. с. 358089 СССР, МПК5 В 23 В 1/00. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / Н.А. Ярославцева, В.М. Ярославцев, В.Н. Подураев; заявитель Московское высшее техническое училище им. Баумана. № 1615026/25-8; заявл. 25.01.1971; опубл. 03.11.1972, Бюл. № 34.
24. Куц В.В., Бышкин А.С., Разумов М.С. Сверление отверстий в напряженно-деформированном материале заготовки // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 3 (18). С. 20-23.
25. Экспериментальные исследования процесса сверления отверстий медного сплава в напряженно-деформированном материале заготовки / В.В. Куц, А.С. Бышкин, М.С. Разумов, В.С. Кочергин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 1. С. 13-15.
26. Kuts V.V., Razumov M.S., Byshkin A.S. Experimental studies of hole drilling operations in stress-strain workpiece material // MATEC Web of Conferences. 2018. p. 01011.
27. Патент на изобретение RU 2686572, 29.04.2019. Способ определения величины предела пропорциональности материалов / Куц В.В., Разумов М.С., Бышкин А.С., Щербаков П.С. Заявка № 2017138540 от 07.11.2017.
28. Способ и устройство для определения предела упругости в заготовках деталей / В.В. Куц, М.С. Разумов, А.С. Бышкин, О.И. Дрынова // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. науч. тр. 7-ой Междунар. науч.-практ. конф. Курск: Издательство: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2017. С. 216-218.
29. Куц В.В., Бышкин А.С., Разумов М.С. Метод определения пределов упругости и пропорциональности материалов для последующего сверления заготовок в напряженно-деформированном состоянии // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). С. 164-170.
30. Бондарев А.А. Исследование влияния опережающей пластической деформации на эффективность процесса резания конструкционных сталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград: Волгогр. гос. техн. ун-т, 2016. 19 с.

Поступила 22.03.2021; принята к публикации 17.06.2021

Информация об авторах

Куц Вадим Васильевич - д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50-лет Октября, 94), тел. 89036399401, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Бышкин Александр Сергеевич - аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50-лет Октября, 94), тел. 89510897934, e-mail: alex141293@rambler.ru

Разумов Михаил Сергеевич - канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50-лет Октября, 94), тел. 89081292777, e-mail: mika_1984_@mail.ru

RESEARCH OF CHANGE IN INTERNAL STRESSES IN THE PROCESS OF DRILLING BLOCKS FROM NON-FERROUS ALLOYS IN A PRELIMINARY ELASTIC-DEFORMED STATE

V.V. Kuts, A.S. Byshkin, M.S. Razumov

Southwest State University, Russia, Kursk

Abstract: drilling holes is one of the most common operations in the manufacture of parts. As a result, increasing the efficiency of this process is an urgent task. To improve the efficiency of the drilling process, we developed a method for drilling in a pre-stress-strain material of the workpiece, which is subjected to elastic deformation by a load not exceeding the proportionality limit of the workpiece material. After removing the load, the dimensions of the workpiece remain the same. We show that with this method of drilling, a decrease in the axial component of the cutting force from 20 to 30% is observed. The reason for this is that the workpiece material will enter the cutting zone, namely the primary deformation zone, being in a pre-deformed state, which contributes to the saturation of the crystal lattice of the metal being processed with energy. Within the framework of the presented work, we carried out the modeling of the process of drilling workpieces from non-ferrous alloys in a pre-elastically deformed state. Of particular interest in the disclosure of the mechanism of this phenomenon is the study and description of changes in the zone of the preliminary elastic-deformed state of the processed material at different drilling depths. This study was carried out in the DEFORM-3D finite element analysis environment. Thus, it can be argued that the elastically deformed state of the processed material will be provided in the cutting zone throughout the entire processing time

Key words: drilling, elastic limit, device, deformation, workpiece, fracture, proportionality limit, physical and mechanical properties

Acknowledgements: the research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project No. 19-38-90108

References

1. Razumov M.S., Zavorin M.K., Gatiev M.Sh., Byshkin A.S. "Device for drilling holes with the imposition of vibrations on the workpiece", *Proc. of Scientific Articles of the 8th Int. Scientific and Practical Conf.: Modern Materials and Technology (Covremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya: sb. nauch. st. 8-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Kursk, Universitetskaya kniga, 2018, pp. 347-352.
2. Vinogradova, N.V. "Theoretical study of the magnitude of residual stresses from structural-phase transformations in the surface layer of parts after mechanical processing", *Proc. of International Scientific Conf.: Topical Issues of Engineering and Technology (Aktual'nye voprosy tekhniki i tekhnologii: sb. dokl. mezhdunar. nauch. zaoch. konf.)*, ed. by A.V. Gorbenko, S.V. Dovzhenko, Lipetsk, De-facto, 2010, vol. 1, pp. 111-115.
3. Emelyanov S.G., Sidorova V.V., Ponomarev V.V., Razumov M.S. "Determining the geometric parameters of a sheared layer in drilling of nonferrous metals and alloys with the use of axial vibrations", *Chemical and Petroleum Engineering*, 2017, vol. 52, no. 11-12, pp. 796-800.
4. Emelyanov S.G., Sidorova V.V., Ponomarev V.V., Razumov M.S. "Determination of the geometric parameters of the cut layer when drilling non-ferrous metals and alloys with the imposition of axial vibrations", *Chemical and Oil and Gas Engineering (Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroyeniye)*, 2016, no. 11, pp. 45-47.
5. Sidorova V.V., Razumov M.S. "Device for vibration drilling", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2014, no. 4 (306), pp. 51-54.
6. Sidorova V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N. "Calculation of power parameters of vibration cutting", *Proc. of the Seventh All-Russian Conf. of Young Scientists and Specialists: The Future of Mechanical Engineering in Russia" (Budushchee mashinostroeniya Rossii: sb. tr. Sed'moy Vseros. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov)*, Bauman Moscow State Technical University, 2014, pp. 10-11.
7. Sidorova V.V., Razumov M.S., Ponkratov P.A. "Device for vibration drilling" ("Ustroystvo dlya vibratsionnogo sverleniya"), patent for utility model RU 147317 U1, 10.11.2014, application no. 2014120738/02 dated 22.05.2014.
8. Razumov M.S., Sidorova V.V., Grechukhin A.N. "Automated control of process conditions during drilling with exposure of vibrations", *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, vol. 6, no. 5, pp. 19-23.
9. Sidorova V.V., Razumov M.S. "Improving the performance of vibration drilling of small diameter holes in blanks made of titanium alloys", *VII International Scientific and Practical Conf.: Integration of Science and Practice as a Condition for Economic growth (Integratsiya nauki i praktiki kak uslovie ekonomicheskogo rosta: VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Ulyanovsk State Technical University, 2014, pp. 11-12.
10. Emelyanov S.G., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Sidorova V.V. "Identification of empirical dependences of the design parameters of the device for applying vibrations to the axial force when drilling small diameter holes", *Fundamental Research (Fundamental'nye issledovaniya)*, 2015, no. 10-3, pp. 484-488.
11. Sidorova V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N. "Determination of the dependence of the force of permanent magnets on the distance during vibration cutting", *Proc. of the 5th International Scientific and Practical Conf.: Innovations, Quality and Service in Engineering and Technology (Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyakh: sb. nauch. tr. 5-oy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, ed. by Gorokhov A.A., 2015, pp. 284-287.
12. Sidorova V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Emelyanov S.G. "Analysis of the dependences of the parameters of permanent magnets and their installation on the vibration force during drilling with the imposition of axial vibrations", *Proc. of the Sev-*

enth All-Russian Conf. of Young Scientists and Specialists: The Future of Mechanical Engineering in Russia” (*Budushchee mashinostroeniya Rossii: sb. tr. Sed'moy Vseros. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov*), 2015, pp. 34-37.

13. Sidorova V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N. “Automated means of controlling technological parameters when drilling with the imposition of vibrations”, *Proc. of the I International Scientific Conference of Young Scientists: Electrical Engineering. Power Engineering. Mechanical Engineering (Elektrotehnika. Energetika. Mashinostroenie: sb. nauch. tr. I Mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh.)*, 2014, pp. 154-156.

14. Sidorova V.V., Ponomarev V.V., Razumov M.S. “Device for drilling with the imposition of axial vibrations” (“Ustroystvo dlya sverleniya s nalozheniem osevykh vibratsiy”), patent for utility model RU 179403 U1, 14.05.2018, application no. 2017107102 of 03.03.2017.

15. Polyanchikov Yu.N. et al. “The influence of advanced plastic deformation on tool wear and the quality of the surface layer in the processing of austenitic steels”, *News of VolgSTU (Izvestiya VolgGTU)*, 2008, no. 9, pp. 35-37.

16. Ignatov S.N., Karpov A.V., Raspopin A.P. “Evaluation of the efficiency of blade processing using a dimensionless energy criterion”, *STIN*, 2004, no. 12, pp. 23-25.

17. Ingemansson A.R., Shchedrikov S.O., Polyanchikov Yu.N. “Improving the machinability of stainless steels when using cutting with advanced plastic deformation”, *Proc. of XV Regional Conf. of Young Researchers of the Volgograd Region (XV regional'naya konferentsiya molodykh issledovateley Volgogradskoy oblasti)*, Volgograd, 2011, pp. 76-77.

18. Ingemansson A.R. “Improving the efficiency of turning hard-to-work steels of ferritic, martensitic-ferrite and martensitic classes using advanced plastic deformation” (“Povyshenie effektivnosti tocheniya trudnoobrabatyvayemykh staley ferritnogo, martensitno-ferritnogo i martensitnogo klassov s ispol'zovaniyem operezhayushchego plasticheskogo deformirovaniya”), dis. of Cand. of Technical Sciences, Volgograd, 2012, 209 p.

19. Ingemansson A.R. et al. “Mathematical model of the formation of roughness of the treated surface when turning with advanced plastic deformation of corrosion-resistant steels”, *Metal Treatment (Metalloobrabotka)*, 2012, no. 1, pp. 11-15

20. Norchenko P.A., Ingemansson A.R., Polyanchikov Yu.N. “Method of cutting austenitic steels with advanced plastic deformation and its advantages from the point of view of the crystal theory of the structure of metals”, *Proc. of XIII Regional Conf. of Young Researchers of the Volgograd Region (XIII regional'naya konferentsiya molodykh issledovateley Volgogradskoy oblasti)*, Volgograd, 2009, pp. 74-77.

21. Norchenko P.A. “Improving the efficiency of the cutting process of austenitic stainless steels with advanced plastic deformation” (“Povyshenie effektivnosti protsessa rezaniya nerzhavayushchikh staley austenitnogo klassa s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem”), dis. of Cand. of Technical Sciences, Volgograd, 2010, 127 p.

22. Norchenko P.A., Ingemansson A.R., Polyanchikov Yu.N. “Improving the roughness of the treated surface when cutting stainless steel 12X18H10T with advanced plastic deformation”, *Proc. of XIV Regional Conf. of Young Researchers of the Volgograd Region (XIV regional'naya konferentsiya molodykh issledovateley Volgogradskoy oblasti)*, Volgograd, 2010, pp. 63-64.

23. Yaroslavtseva N.A., Yaroslavtsev V.M., Poduraev V.N. “Method of processing by cutting with advanced plastic deformation” (“Sposob obrabotki rezaniem s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem”), Author's Certificate, 358089 USSR, MPK5 B 23 B 1/00, no. 1615026/25-8; publ. 03.11.1972, bull. no. 34.

24. Kuts V.V., Byshkin A.S., Razumov M.S. “Drilling holes in the stress-strain material of the workpiece”, *Modern Materials, Equipment and Technologies (Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii)*, 2018, no. 3 (18), pp. 20-23.

25. Kuts V.V., Byshkin A.S., Razumov M.S., Kochergin V.S. “Experimental studies of the process of drilling holes of a copper alloy in a stressed-deformed material of a billet”, *Assembly in Machine Building, Instrument Making (Sborka v mashinostroenii, priborostroenii)*, 2020, no. 1, pp. 13-15.

26. Kuts V.V., Razumov M.S., Byshkin A.S. “Experimental studies of hole drilling operations in stress-strain workpiece material”, *MATEC Web of Conferences*, 2018, pp. 01011.

27. Kuts V.V., Razumov M.S., Byshkin A.S., Shcherbakov P.S. “Method for determining the value of the limit of proportionality of materials” (“Sposob opredeleniya velichiny predela proporsional'nosti materialov”), patent for the invention RU 2686572, 29.04.2019, application no. 2017138540 dated 07.11.2017.

28. Kuts V.V., Razumov M.S., Byshkin A.S., Drynova O.I. “Method and device for determining the elastic limit in the workpieces of parts”, *Proc. of the 7th Int. Scientific and Practical Conf.: Innovations, Quality and Service in Engineering and Technology (Innovatsii, kachestvo i servis v tekhnike i tekhnologiyakh: sb. nauch. tr. 7-oy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Kursk, 2017, pp. 216-218.

29. Kuts V.V., Byshkin A.S., Razumov M.S. “Method for determining the limits of elasticity and proportionality of materials for subsequent drilling of workpieces in a stress-strain state”, *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2020, no. 3 (341), pp. 164-170.

30. Bondarev A.A. “Investigation of the influence of advanced plastic deformation on the efficiency of the cutting process of structural steels” (“Issledovanie vliyaniya operezhayushchey plasticheskoy deformatsii na effektivnost' protsessa rezaniya konstruksionnykh staley”), diss. of the Cand. of Technical Sciences, Volgograd State Technical University, 2016, 19 p.

Submitted 22.03.2021; revised 17.06.2021

Information about the authors

Vadim V. Kuts, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, South-Western State University (94 50-let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), tel. +79036399401, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Aleksandr S. Byshkin, Graduate student, South-Western State University (94 50-let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), tel. +79510897934, e-mail: alex141293@rambler.ru

Mikhail S. Razumov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, South-Western State University (94 50-let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), tel. +789081292777, e-mail: mika_1984_@mail.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю.А. Цеханов¹, М.Н. Подоприхин¹, И.В. Шепеленко², Я.Б. Немировский²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина

Аннотация: предложен метод определения пластичности малопластичных материалов. Он заключается в осевом сжатии цилиндрического образца, состоящего из нескольких сопряженных втулок из разных материалов: из исследуемого малопластичного и из высокопластичных. При деформировании в исследуемой втулке создается высокое гидростатическое давление, повышающее ее пластичность и деформируемость. Разработана теоретическая модель сжатия такого составного образца, позволяющая экспериментально достигать пластического разрушения хрупкого материала при высоком гидростатическом давлении. Это достигается как выбором пластичного материала, так и положением втулки из малопластичного материала по отношению к втулкам из высокопластичных материалов. Точность предложенного метода подтверждена сравнением результатов расчетов как по модели, так и с помощью метода конечных элементов. Расчеты, выполненные по разработанной модели, позволяют определять параметры напряженно-деформированного состояния образца из исследуемого малопластичного материала, а также его накопленную до разрушения деформацию при различных отрицательных значениях коэффициента жесткости. Разработанный метод использован для определения пластичности чугуна СЧ20, из которого изготавливаются гильзы двигателей, обрабатываемых с помощью деформирующего протягивания, когда в контактной зоне с инструментом возникают большие гидростатические давления и пластические деформации. В этом случае для оценки качества обработки необходимо рассчитывать ресурс использованной пластичности с помощью диаграммы пластичности чугуна. В экспериментах достигнуты значительные деформации хрупкого чугуна. Полученные результаты позволили построить диаграмму пластичности чугуна в области высокого гидростатического сжатия

Ключевые слова: теоретическая модель, напряженно-деформированное состояние, чугун, пластичность, деформация

Введение

Наметившиеся тенденции в производстве и эксплуатации машин и механизмов направлены на существенное улучшение их эксплуатационных свойств, прежде всего за счет повышения качества рабочих поверхностей деталей [1]. В соответствии с современными представлениями качество поверхностного слоя – комплексное понятие, определяемое совокупностью геометрических характеристик и физико-химических свойств как результат технологического воздействия на данную поверхность.

Качество поверхностного слоя достигается на стадии получения заготовок при их дальнейшей обработке и зависит, прежде всего, от технологического метода обработки поверхности, обеспечивающего получение оптимальной шероховатости в зоне контактирования и необходимых физико-механических свойств рабочих поверхностей детали [2].

Актуальность исследований

В настоящее время, кроме вышеперечисленных параметров, для оценки качества обработанной детали используют параметр, характеризующий способность материала деформироваться без разрушения или значительного накопления внутренних дефектов, – пластичность [3, 7]. Следует отметить, что при обработке деталей первыми браковочными признаками являются микротрещины, возникающие из-за исчерпания материалом заготовки своего ресурса пластичности. С этой точки зрения особенно важной задачей технолога является разработка расчетных схем и методик, позволяющих оценить как величину использованной, так и остаточной пластичности обрабатываемого материала, тем самым прогнозировать и обеспечивать технологическими методами этот параметр качества обработки. Следовательно, исследования пластичности как одной из важных характеристик качества обработанной детали и ее работоспособности являются актуальными и своевременными.

Как известно [1, 2], возможности пластического формоизменения металлов ограничены

их разрушением. Особенно этот вопрос актуален при обработке изделий из малопластичных материалов, к которым относятся детали из чугуна [13]. Например, при деформирующем протягивании отверстий в чугунных гильзах двигателей. При этом особенно важным становится изучение показателей пластичности такого конструкционного материала, как графитсодержащий чугун, возможности пластического формоизменения которого ограничены разрушением.

Для этого используется такой параметр качества, характеризующий дефектность поверхностного слоя, как ресурс использованной пластичности Ψ [1, 3, 4].

Обзор литературы

Пластичность металла зависит от ряда факторов, среди которых, кроме природы самого материала, наиболее важными являются термомеханические параметры процесса обработки: вид напряженного состояния, температура, скорость деформирования, история деформирования и др. [4, 6]. Зависимость пластичности от вида напряженного состояния характеризуется диаграммой пластичности, являющейся механической характеристикой материала [5]. Диаграмму пластичности представляют в координатах: «коэффициент жесткости напряженного состояния η – накопленная до разрушения деформация e_0 »

Обычно для пластичных материалов при построении диаграммы пластичности используют результаты испытаний материала на растяжение, сжатие, изгиб и кручение [6]. В работе [7] помимо указанных испытаний производили растяжение образца с выточкой, растяжение с наложением гидростатического давления, выдавливание образцов жидкостью высокого давления. Следует отметить, что практически все исследования касались обработки пластичных материалов для случаев $\eta > 0$ и только в некоторых случаях программа испытаний обеспечивала $0 > \eta > -1$ [8].

В то же время для малопластичных материалов этот вопрос изучен недостаточно. Последнее связано с тем, что обработка изделий из малопластичных материалов холодным пластическим деформированием традиционно считалась неосуществимой. Однако данные ряда работ [9, 10] указывают на возможность и перспективность исследования в этом направлении. В [9] показано, что при деформирующем

протягивании с малыми натягами, в том числе и чугунных заготовок [13], в зоне контакта возникает сильное объемное сжатие, которое повышает пластичность чугуна, что обеспечивает его большие пластические деформации. Научная основа для пластической обработки малопластичных материалов сформулирована в работе [11], где указано, что при создании определенных условий (близких к всестороннему сжатию) даже хрупкие материалы могут вести себя как пластичные, то есть иметь определенные остаточные деформации.

В работе [12] экспериментально показано, что при совместном сжатии пластичного и малопластичного материалов появляются возможности влиять на параметры напряженно-деформированного состояния (НДС), а также на гидростатическое давление и показатели жесткости напряженного состояния. Следовательно, возникает необходимость в разработке теоретической модели деформирования составного образца в комбинации материалов «малопластичный – пластичный».

Вышеприведенные данные указывают на возможность применения пластической деформации изделий из чугуна СЧ20, например, гильз двигателей внутреннего сгорания. Но для расчета технологических параметров, обеспечивающих качество изделия по параметрам использованной и остаточной пластичности, необходимо построить диаграмму пластичности для этого материала.

Для построения диаграммы пластичности следует выполнить механические испытания исследуемых материалов в условиях простого нагружения и деформирования, когда напряжения и деформации изменяются пропорционально одному параметру. Для такого малопластичного материала как чугун испытания на одноосное и двухосное растяжения показали практически полное отсутствие пластической деформации, при этом имело место хрупкое разрушение образцов [13]. В то же время при испытаниях на кручение и на сжатие, где показатель напряженного состояния соответственно $\eta = 0$ и $\eta = -1$, была зафиксирована незначительная пластическая деформация (при одноосном сжатии до 12%). Данных о пластичности чугуна в условиях объемного сжатия в доступной литературе нет. Поэтому определение пластичности такого малопластичного материала как чугун СЧ20 в условиях высоких гидростатических давлений является актуальной научной и технологической проблемой.

Целью представленной работы является разработка метода определения пластичности малопластичных материалов и исследование пластичности чугуна СЧ20 в условиях высокого объемного сжатия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать метод получения значительных деформаций малопластичных материалов. Для этого следует разработать теоретическую модель испытаний образца из малопластичного материала, позволяющую учитывать влияние его конструктивных параметров и степень его деформирования на значения гидростатического давления и показателя жесткости напряженного состояния;

- выполнить экспериментальные исследования сжатия чугуна при различных отрицательных значениях показателя жесткости напряженного состояния образца;

- построить диаграмму пластичности чугуна СЧ20 в области высокого гидростатического давления.

Теоретическая модель сжатия цилиндрического образца

В работе [9] получено решение для деформированного состояния трубных заготовок в процессе их равномерной раздачи, когда их поперечные сечения остаются плоскими и осевые деформации неизменны вдоль оси z (рис. 1):

$$e_{\varphi} = \left(e_{\varphi 0} + \frac{k}{2} \right) \left(\frac{r_B}{r} \right)^2 - \frac{k}{2}, \quad (1)$$

где k – относительная осевая деформация, постоянная по всему объему заготовки;

e_{φ} – окружная деформация в т. А с координатой r .

Интенсивность деформаций (накопленная деформация)

$$e_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_{\varphi}^2 + k \cdot e_{\varphi} + k^2}. \quad (2)$$

Данное решение можно применить и к случаю осевого сжатия цилиндрического образца, заключенного по наружной поверхности в жесткую цилиндрическую обойму.

При этом, очевидно, на наружной поверхности образца при $r=r_n$ окружная деформация

$$e_{\varphi n} = 0 \quad (3)$$

После преобразования получаем

$$e_{\varphi} = \frac{k}{2} \left[\left(\frac{r_n}{r} \right)^2 - 1 \right]. \quad (4)$$

Поскольку $e_z = k < 0$, то из условия несжимаемости получаем

$$e_r = -\frac{k}{2} \left(\frac{r_n}{r} \right)^2. \quad (5)$$

Подставляя (5) в выражение (2), находим

$$e_0 = \frac{k}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{r_n}{r} \right)^4 + 3}. \quad (6)$$

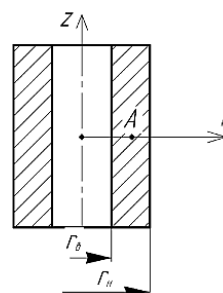


Рис. 1. Расчетная схема

Напряженное состояние в сжимаемом образце определяем по известным в деформационной теории пластичности зависимостям [14]:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2}{3} \frac{e_r}{e_0} \sigma_0(e_0) + \sigma; \\ \sigma_{\varphi} &= \frac{2}{3} \frac{e_{\varphi}}{e_0} \sigma_0(e_0) + \sigma; \\ \sigma_z &= \frac{2}{3} \frac{k}{e_0} \sigma_0(e_0) + \sigma, \end{aligned} \quad (7)$$

где σ_r , σ_{φ} , σ_z – соответственно радиальное, окружное и осевое напряжения;

σ – гидростатическое давление (среднее напряжение), определяемое как

$$\sigma = \frac{\sigma_r + \sigma_{\varphi} + \sigma_z}{3}; \quad (8)$$

$\sigma_0(e_0)$ – интенсивность напряжений, зависящая для упрочняющегося материала от e_0 . Эта зависимость определяется экспериментально, а ее график называется кривая упрочнения или кривая течения.

Дополнительным уравнением является дифференциальное уравнение равновесия, которое в случае нашей осесимметричной задачи имеет вид:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\varphi}}{r} = 0. \quad (9)$$

С учетом (7) оно принимает вид:

$$d\sigma_r = \left[\frac{2}{3} \frac{e_{\varphi}}{e_0} \sigma_0(e_0) - \frac{2}{3} \frac{e_r}{e_0} \sigma_0(e_0) \right] \frac{dr}{r}. \quad (10)$$

Интегрируя (10) вдоль радиуса, получаем распределение радиального напряжения по тол-

щине стенки.

Величину гидростатического давления находим из (7):

$$\sigma = \sigma_r - \frac{2}{3} \frac{e_r}{e_0} \sigma_0(e_0) \quad (11)$$

и вычисляем напряжения σ_φ и σ_z .

На внутренней поверхности образца при $r=r_в$ деформации равны

$$e_{\varphi в} = \frac{k}{2} \left[\left(\frac{r_н}{r_в} \right)^2 - 1 \right]; \quad (12)$$

$$e_{r в} = -\frac{k}{2} \left(\frac{r_н}{r_в} \right)^2; \quad (13)$$

$$e_{0 в} = \frac{|k|}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{r_н}{r_в} \right)^4} + 3. \quad (14)$$

Поскольку на свободной внутренней поверхности $\sigma_r=0$, то на ней из (7)

$$\sigma = -\frac{2}{3} \frac{e_{r в}}{e_{0 в}} \sigma_0(e_{0 в}), \quad (15)$$

а коэффициент жесткости напряженного состояния

$$\eta = -\frac{3\sigma}{\sigma_0(e_0)} = -2 \frac{e_{r в}}{e_{0 в}} \quad (16)$$

Подставляя (5) и (6) в (16), можно вычислить η в любой точке А (рис. 1). В частности, на свободной внутренней поверхности

$$\eta = -2 \frac{-\frac{k}{2} \left(\frac{r_н}{r_в} \right)^2}{\frac{|k|}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{r_н}{r_в} \right)^4} + 3} = -\sqrt{3} \frac{\left(\frac{r_н}{r_в} \right)^2}{\sqrt{\left(\frac{r_н}{r_в} \right)^4} + 3}. \quad (17)$$

Здесь в (17) знак минус поставлен с учетом того, что осевая деформация $k < 0$.

В том случае, если образец составлен из нескольких цилиндров из разных материалов, то интегрирование уравнения (10) осуществляется от внутренней свободной поверхности последовательно для каждого слоя.

Разработанная модель деформации трубчатого образца позволила осуществить расчет НДС чугунного образца из СЧ20 при его сжатии в условиях стесненной окружной деформации на его наружной поверхности.

Экспериментально полученную кривую упрочнения чугуна СЧ20 [15] аппроксимировали зависимостью

$$\sigma_0 = 952,42 \cdot e_0^{0,167}, \text{ МПа}. \quad (18)$$

В качестве примера изменение гидростатического давления и показателя жесткости напряженного состояния вдоль относительного радиуса образца $r/r_в$ (т.е. для $r_в = 1$ мм), рассчитанных по

разработанной модели для образца с $r_н/r_в = 3$ в пределах $1 \leq r \leq 3$ представлено на рис. 2.

Расчет гидростатического давления выполнялся по (10, 11), а коэффициента жесткости по (16).

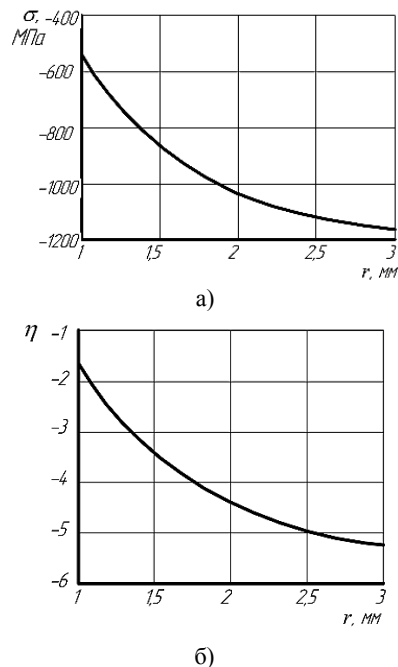


Рис. 2. Изменение гидростатического давления (а) и показателя жесткости напряженного состояния (б) в зависимости от относительного радиуса заготовки

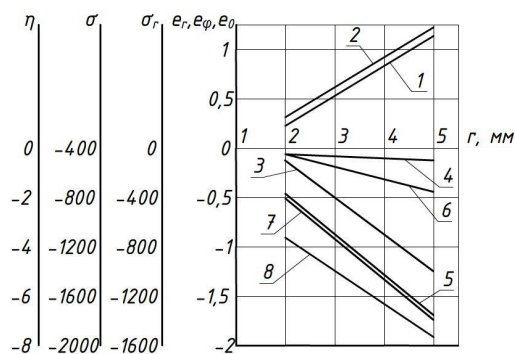


Рис. 3. Зависимость деформации, напряжений, гидростатического давления, показателя жесткости напряженного состояния от радиуса r по расчетам, выполненным согласно разработанной модели: 1 – e_r ; 2 – e_φ ; 3 – e_φ при r_{min} ; 4 – σ_r при r_{min} ; 5 – σ_r при r_{max} ; 6 – σ при r_{min} ; 7 – σ при r_{max} ; 8 – η при r_{max}

Максимальное значение гидростатического давления (более 1 ГПа, рис. 2, а) имеет место на внутренней поверхности образца, а минимальное – на наружной. Коэффициент жесткости напряженного состояния (рис. 2, б) изменяет свое значение по толщине стенки от $\eta \approx -2$ до $\eta \approx -5$. Такое изменение указывает на возможность получения различных степеней объ-

емного сжатия изменением толщины стенки образца.

Аналогичные расчеты выполнялись для образцов из чугуна СЧ20 с другими толщинами стенки: $1 \leq r \leq 2$; $1 \leq r \leq 2,5$; $1 \leq r \leq 5$. Результаты расчетов, согласно указанным диапазонам, позволили установить влияние толщины стенки на параметры напряженно-деформированного состояния (рис. 3).

Полученные зависимости (рис. 3) свидетельствуют о том, что параметры e_r , e_φ , e_θ , σ_r , σ и η изменяются практически пропорционально радиусу r . Это позволяет управлять этими параметрами, что особенно важно для экспериментального достижения необходимого значения показателя жесткости напряженного состояния η .

Моделирование сжатия цилиндрического образца методом конечных элементов

Для оценки точности разработанной аналитической модели сжатие цилиндрического чугунного образца моделировали методом конечных элементов (МКЭ).

1. Методика моделирования

Моделирование осадки чугунных образцов в условиях стесненной окружной деформации по наружной поверхности выполнялось по схеме, представленной на рис. 4, с использованием программного комплекса Deform-3D.

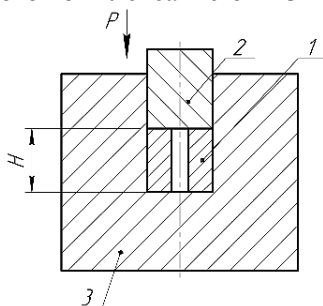


Рис. 4. Схема сжатия цилиндрического образца: 1 – исследуемый образец; 2 – пуансон; 3 – матрица

Исследуемый образец 1 (рис. 4) в форме втулки высотой H с внутренним круглым отверстием свободно размещался в отверстии матрицы 3, которая основанием жестко закреплена. Пуансону 2 задавалось равномерное перемещение. К образцу 1 через пуансон 2 прикладывалась осевая нагрузка P . Максимальная степень осадки соответствовала полному закрытию внутреннего отверстия образца. Его начальные наружный и внутренний радиусы

равны 8 мм и 2 мм соответственно. Для повышения точности расчетов при моделировании плотность генерированной сетки расчетных узлов составила 0,25 мм.

Для анализа явлений, имеющих место на поверхности обрабатываемого отверстия, были проставлены точки 1...10.

Осадка моделировалась пошагово. Весь диапазон осадки был разбит на 40 шагов. Когда на последнем шаге сила сжатия и величина интенсивности напряжений резко начинали возрастать, процесс симуляции останавливали.

2. Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены в виде изолиний и кривых истории параметров для отдельных материальных точек.

На рис. 5 показаны результаты моделирования распределения накопленной деформации e_0 и интенсивности напряжений σ_0 для 10-го шага осадки при осевой деформации сжатого образца 10%.

Распределение интенсивности деформации e_0 (рис. 5, а) у наружной поверхности образца, которая контактирует с жесткой матрицей, незначительное и возрастает к внутренней поверхности. Распределение интенсивности напряжений σ_0 (рис. 5, б), следуя закономерностям e_0 , также возрастает к центру образца.

Выполненный анализ НДС показывает существенную неравномерность его распределения по объему осаживаемого образца, т.е. отличие схемы осадки с ограничением радиальных перемещений по наружной поверхности образца от известной схемы свободной осадки цилиндрического образца.

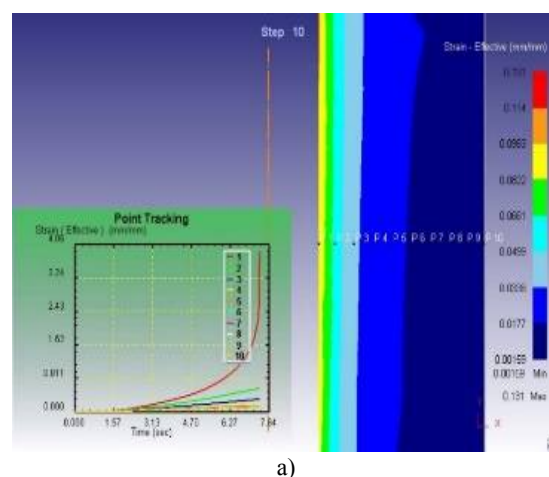


Рис. 5. Поле распределения накопленной деформации e_0 (а) и интенсивности напряжений σ_0 (б) на 10 шаге и графики их изменения за всю историю деформирования

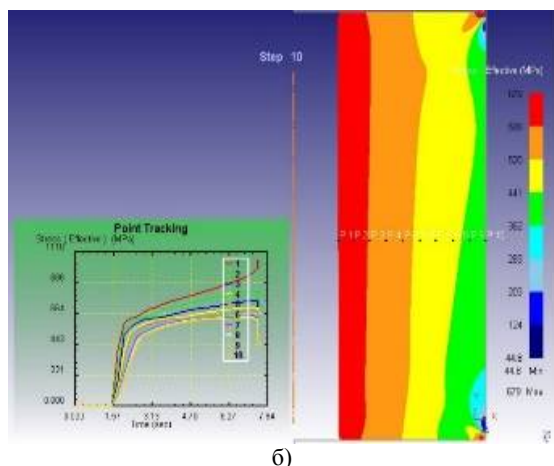


Рис. 5. Поле распределения накопленной деформации ϵ_0 (а) и интенсивности напряжений σ_0 (б) на 10 шаге и графики их изменения за всю историю деформирования (продолжение)

На рис. 6, а, б приведено распределение по толщине стенки гидростатического давления σ и коэффициента жесткости η для различных степеней осадки $k = 0,05 \div 0,4$. Оно показывает, что величина η существенно меняется по толщине стенки, что позволяет осуществлять процесс деформирования чугуна СЧ20 при различных значениях η и использовать полученные результаты для построения его диаграммы пластичности.

В рабочем диапазоне степени осадки $k = 0,1 \div 0,4$ величина η у внутренней и внешней поверхностях образца (рис. 7) практически не изменяется, а в середине толщины это изменение составляет порядка 12%, что позволяет при экспериментальной реализации данной схемы осадки поддерживать практически постоянство величины η , что важно при построении диаграммы пластичности. Существенное отклонение от этого условия для малой степени осадки при $k = 0,05$ (5%) практически не значимо, т.к. предельная деформация чугуна при сжатии равна 0,12 (12%).

Сравнение результатов моделирования процесса осадки образца с данными, полученными согласно теоретической модели, показало их хорошее совпадение, что подтверждает точность предложенного метода определения пластичности.

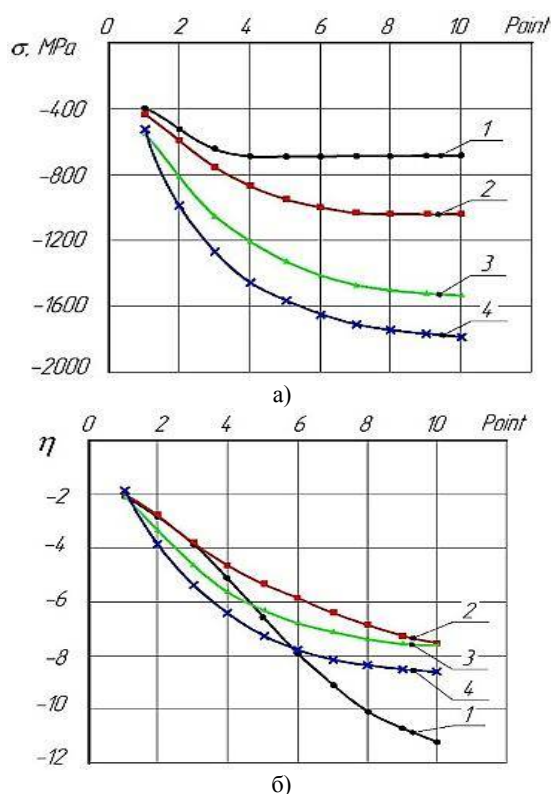


Рис. 6. Распределение гидростатического давления σ по толщине стенки образца (а) и коэффициента жесткости напряженного состояния η (б) образца при различных степенях его осадки k : 1 – $k = 0,05$; 2 – $k = 0,1$; 3 – $k = 0,3$; 4 – $k = 0,4$

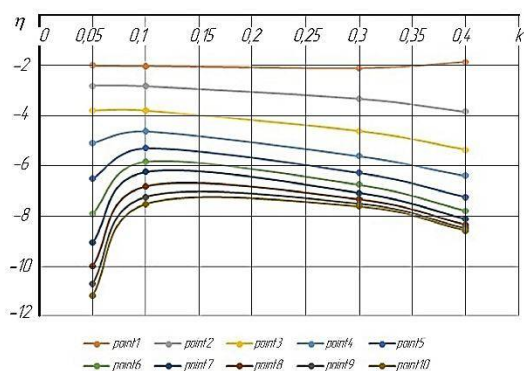


Рис. 7. Изменение коэффициента жесткости напряженного состояния η в зависимости от степени осадки образца k

Экспериментальные исследования сжатия цилиндрического чугунного образца

1. Методика экспериментальных исследований

Выполненные теоретические исследования и данные моделирования позволяют составить программу испытаний составных образцов из чугуна и пластичного материала при различных

отрицательных значениях показателя жесткости напряженного состояния η .

Для проведения испытаний разработано и изготовлено специальное устройство (рис. 8, а, б), состоящее из исследуемого образца 2, сопряженного с обоймой 1 для сжатия, а также двух пуансонов 3. Обойма 1 представляет собой втулку с бесконечной толщиной стенки, которая пластически не деформируется и обеспечивает отсутствие окружающих пластических деформаций на наружной поверхности образца. Осевое сжатие для уменьшения влияния сил трения выполняется двумя пуансонами 3, перемещающимися навстречу друг другу с усилием P . Образец 2 при сжатии деформируется в осевом и радиальном направлениях.

В качестве объекта исследования был выбран сборный образец, состоящий из тонкостенной втулки из чугуна СЧ20 и пластичного материала (латунь и медь) (рис. 9).

Для определения предельной деформации до разрушения образец, установленный в специальное устройство, плавно нагружался осевой сжимающей силой. Начало разрушения фиксировалось в момент появления характерного кратковременного хрустящего звука, падением силы посредством следящей стрелки силоизмерителя, а также преобразователем силы и перемещений с самопишущим прибором. Для визуального контроля характера разрушения чугунной втулки составной образец разрезали и изучали под микроскопом.

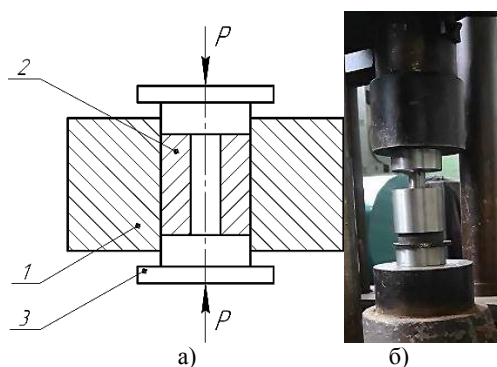


Рис. 8. Устройство для сжатия образцов: а – схема устройства; б – общий вид устройства

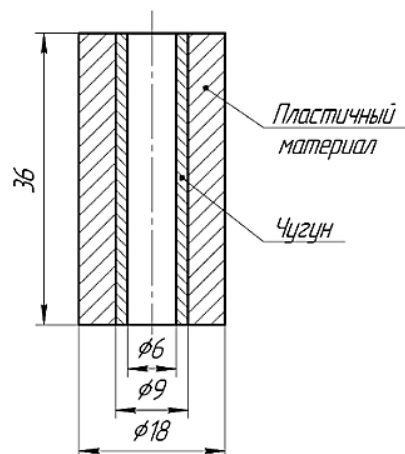


Рис. 9. Размеры составного образца

2. Результаты экспериментальных исследований

Для сжатия составного образца было выбрано следующее сочетание материалов: «чугун СЧ20 – латунь Л63» (рис. 10, а). Следует отметить, что латунь Л63 – упрочняемый материал, эффективно используемый в качестве антифрикционного покрытия.

При данной паре составного образца процесс сжатия происходил устойчиво, осевая деформация до разрушения при этом составила $k = - 0,096$. Образовавшаяся трещина в чугунном образце показана на рис.10, б.

Как видно из рис. 10,б, вид разрушения чугунного образца – смешанный. Следует отметить, что наряду с появлением пластических участков исчерпания ресурса пластичности трещина имеет участки хрупкого разрушения.

Расчет накопленной деформации выполнялся по (14), поскольку она не зависит от свойств материала, а только от условия его несжимаемости и от геометрии сжимаемого образца. Гидростатическое давление вычислялась по (10, 11), причем интегрирование (10) велось послойно с учетом пластических свойств разных материалов. Для меди кривая упрочнения описывалась как $\sigma_0 = 439,92 \cdot e_0^{0,539}$, а для латуни $\sigma_0 = 820 + 120e_0$.

Проведенные исследования позволили установить, что при деформировании составного образца «чугун СЧ20 – латунь Л63» накопленная деформация чугунного образца составила $e_0 = 0,39$ (39%) при коэффициенте жесткости $\eta = - 1,89$.

Следующий опыт был проведен для составленного из трех втулок образца: «медь М1 – чугун СЧ20 – медь М1» (рис. 11, а). Размеры

образца обеспечили деформирование при $\eta = -3,6$.

В этом случае была достигнута еще большая пластическая деформация до разрушения $\epsilon_0 = 0,78$ (78%), при осевой деформации $k = -0,28$. Внешний вид зафиксированной трещины представлен на рис. 11, б.

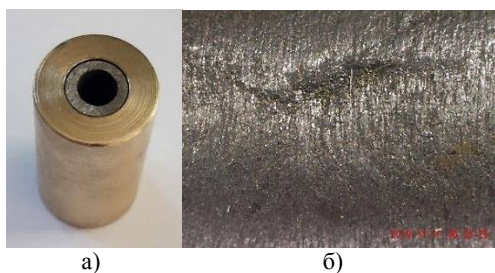


Рис. 10. Общий вид составного образца «чугун СЧ20 – латунь ЛБ3» (а); вид трещины в чугунном образце после сжатия (б)

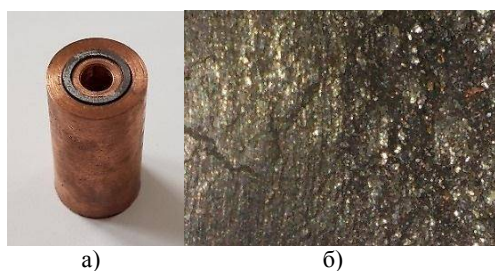


Рис. 11. Общий вид составного образца «медь М1 – чугун СЧ20 – медь М1» (а); вид трещины в чугунном образце после сжатия (б)

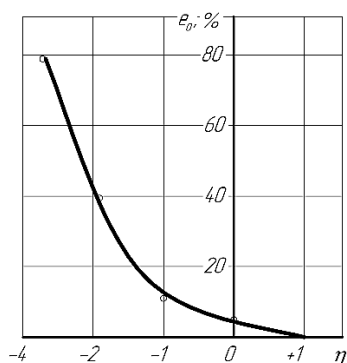


Рис. 12. Диаграмма пластичности чугуна СЧ20

Анализ трещины в чугунном образце (рис. 11, б) позволил определить вид разрушения – пластический. Отчетливо видна магистральная трещина. При разрезке верхней части медной втулки на поверхности чугунного образца зафиксированы значительные пластические деформации, выражающиеся в появлении большого количества дефектов, предшествующих разрушению.

Полученные данные позволили впервые получить диаграмму пластичности чугуна

СЧ20 при значительных отрицательных значениях коэффициента жесткости напряженного состояния η (рис. 12).

Выводы

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие выводы:

- разработан метод получения значительных пластических деформаций малопластичного чугуна СЧ20, заключающийся в разработке теоретической модели деформирования чугунного трубчатого образца при его сжатии в условиях стесненной окружной деформации на наружной поверхности, в том числе и совместном, в комбинации с другими материалами. Это позволяет оказывать влияние на значения гидростатического давления и показателя напряженно-деформированного состояния по толщине стенки;

- расчеты, проведенные согласно разработанной методики, позволили определить параметры НДС, а также создать необходимые условия для определения накопленной до разрушения деформации при различных отрицательных значениях показателя напряженного состояния;

- разработана методика моделирования осадки цилиндрического чугунного образца в условиях объемного сжатия с помощью МКЭ с использованием программного комплекса Deform, что позволило осуществить расчет НДС образца при его сжатии при значительных отрицательных значениях коэффициента жесткости напряженного состояния. Сравнение результатов моделирования процесса осадки чугунного образца с расчетными данными показало их хорошее совпадение;

- эксперименты, спланированные согласно разработанной теоретической модели осадки образца, подтвердили результаты расчетов и позволили впервые получить значительные пластические деформации чугуна при значительных отрицательных значениях показателя жесткости напряженного состояния;

- впервые построена диаграмма пластичности чугуна СЧ20, включающая участок, на котором деформирование происходит при значительных отрицательных значениях показателя жесткости напряженного состояния.

Литература

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000.

2. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. Киев: Наукова думка, 1994.
3. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002.
4. Дель Г.Д. Пластичность деформированного металла // Физика и техника высоких давлений. 1983. № 11 С. 28 – 32.
5. Grushko A.V. Maps of materials in cold working by pressure. Vinnitsa, 2015.
6. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983.
7. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушения. М.: Металлургия, 1970.
8. Ogorodnikov V.A., Kiritsaand I.Yu., Muzyichuk V.I. Plasticity diagrams and peculiarities of their construction // Improving pressure treatment processes and equipment in metallurgy and mechanical engineering. 2006. № 7. P. 251–255.
9. Rosenberg O.A., Tsekhanovand Yu.A., Sheykin S.E. Technological mechanics of deforming broaching. Voronezh, 2001.
10. Grushko A.V. The parameter of the stress state, taking into account the properties of the material and its effect on plasticity // Bulletin of the National Technical University of Ukraine KPI. 2012. 64. P. 222–226.
11. Бриджмен П.В. Новейшие работы в области высоких давлений. М., 1948.
12. Bogomolov Yu.S., Sedokov L.M. Investigation of the gray cast iron strength under radial compression // Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute, 1975.133. P. 32 - 36.
13. Chernyavsky O.V., Sivakand I.O., Lopatenko S.G. Determining the limit of process application of deforming broaching in the processing of cast iron, Improving the technical level of agricultural production and engineering. 2016. 34. P. 82-85.
14. Khachanov L.M. Fundamentals of fracture mechanics. Moscow, 1974.
15. Mechanics of Micro-Cutting Using FANT, Advanced Manufacture Process: Book of Abstracts of the 2 GrabchenkoInternational / Shepelenko et al. // Conference on Advanced Manufacturing Processes. Sumy, 2020. 107.
16. Rosenberg A.M., Rosenberg O.A. Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and deforming broaching. Kiev, 1990.

Поступила 14.04.2021; принята к публикации 21.06.2021

Информация об авторах

Цеханов Юрий Александрович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tsekhanov@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1315-8491>

Подоприхин Михаил Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: podoprihin1@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8757-0699>

Шепеленко Игорь Витальевич - канд. техн. наук, доцент, Центральноукраинский национальный технический университет (25006, Украина, г. Кропивницкий, пр. Университетский, 8), e-mail: kntucpfzk@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1251-1687>

Немировский Яков Борисович – д-р техн. наук, профессор, Центральноукраинский национальный технический университет (25006, Украина, г. Кропивницкий, пр. Университетский, 8), e-mail: provotorova1951@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8005-8584>

METHOD FOR DETERMINING THE PLASTICITY OF LOW-PLASTIC MATERIALS UNDER HIGH HYDROSTATIC PRESSURE

Yu.A. Tsekhanov¹, M.N. Podoprihin¹, I.V. Shepelenko², Ya.B. Nemirovskiy²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Abstract: the article proposes a method for determining the plasticity of low-plastic materials. It consists in axial compression of a cylindrical specimen, consisting of several mating sleeves made of different materials: from the investigated low-plastic and high-plastic ones. During deformation, a high hydrostatic pressure is created in the bushing under study, which increases its plasticity and deformability. We developed a theoretical model of the compression of such a composite sample, which makes it possible to experimentally achieve plastic fracture of a brittle material at high hydrostatic pressure. This is achieved both by the choice of plastic material and by the position of the sleeve made of low plastic material in relation to the bushes made of high plastic materials. The accuracy of the proposed method is confirmed by comparing the calculation results both by the model and by the finite element method. Calculations performed according to the developed model make it possible to determine the parameters of the stress-strain state of a specimen from the investigated low-plastic material, as well as its accumulated deformation before failure at various negative values of the stiffness coefficient. We used the developed method to determine the ductility of cast iron SCH20, from which the liners of engines are made, processed using deforming broaching, when large hydrostatic pressures and plastic deformations arise in the contact zone from the tools. In this case, to assess the quality of processing, it is necessary to calculate the resource of the used plasticity using the plasticity diagram of cast iron. In the experiments, significant deformations of brittle cast iron have been achieved. The results obtained made it possible to construct a diagram of the ductility of cast iron in the area of high hydrostatic compression

Key words: theoretical model; stress-deformed state; cast iron; plasticity; deformation

References

1. Suslov A.G. "Quality of the surface layer of machine parts" ("Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin"), Moscow, Mashinostroenie, 2000.
2. Ryzhov E.V., Klimenko S.A., Gutsalenko O.G. "Technological assurance of the quality of coated parts" ("Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detaley s pokrytiami"), Naukova Dumka, Kiev, 1994.
3. Smelyanskiy V.M. "Mechanics of parts hardening by surface plastic deformation" ("Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem"), Mashinostroenie, Moscow, 2002.
4. Del G.D. "Plasticity of deformed metal", *Physics and Technology of High Pressures (Fizika i tekhnika vysokikh davleniy)*, 1983, vol. 11, pp. 28 - 32
5. Grushko A.V. "Maps of materials in cold working by pressure", Vinnitsa, 2015.
6. Ogorodnikov V.A. "Assessment of the deformability of metals during pressure treatment" ("Otsenka deformiruемости metallov pri obrabotke davleniem"), Vishcha shkola, Kiev, 1983.
7. Kolmogorov V.L. "Tensions. Deformations. Destruction" ("Napyazheniya. Deformatsii. Razrusheniya"), Moscow, Metallurgiya, 1970.
8. Ogorodnikov V.A., Kiritsaand I.Yu., Muzyichuk V.I. "Plasticity diagrams and peculiarities of their construction", *Improving Pressure Treatment Processes and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2006, no. 7, pp. 251–255.
9. Rosenberg O.A., Tsekhanovand Yu.A., Sheykin S.E. "Technological mechanics of deforming broaching", Voronezh, 2001.
10. Grushko A.V. "The parameter of the stress state, taking into account the properties of the material and its effect on plasticity", *Bulletin of National Technical University of Ukraine KPI*, 2012, no. 64, pp. 222–226.
11. Bridgman P.V. "Newest work in the field of high pressure" ("Noveyshie raboty v oblasti vysokikh davleniy"), Moscow, 1948
12. Bogomolov Yu.S., Sedokov L.M. "Investigation of the gray cast iron strength under radial compression", *Bulletin of Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, no. 133, pp. 32 - 36.
13. Chernyavsky O.V., Sivakand I.O., Lopatenko S.G. "Determining the limit of process application of deforming broaching in the processing of cast iron", *Improving Pressure Treatment Processes and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2016, no. 34, pp. 82-85.
14. Khachanov L.M. "Fundamentals of fracture mechanics", Moscow, 1974.
15. Shepelenko I.V. et al. "Mechanics of micro-cutting using FANT, advanced manufacture process: book of abstracts of the 2 GrabchenkoInternational", *Conference on Advanced Manufacturing Processes*, Sumy, 2020, p. 107.
16. Rosenberg A.M., Rosenberg O.A. "Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and deforming broaching", Kiev, 1990.

Submitted 14.04.2021; revised 21.06.2021

Information about the authors

Yuriy A. Tsekhanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: tsekhanov@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1315-8491>

Mikhail N. Podoprikin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: podoprikin1@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8757-0699>

Igor' V. Shepelenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Central Ukrainian National Technical University (7 Universitetskiy prospekt, Kropivnitskiy 25006, Ukraine), e-mail: kntucpfzk@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1251-1687>

Yakov B. Nemirovskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Central Ukrainian National Technical University (7 Universitetskiy prospekt, Kropivnitskiy 25006, Ukraine), e-mail: provotorova1951@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8005-8584>