

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Разработка специального программного обеспечения решения транспортных задач модифицированным генетическим алгоритмом с использованием многопоточности С.Л. Подвальный, Д.А. Вдовин	7
Управление гибким перевернутым маятником на основе метода сингулярных возмущений З. Хатиф Аббас	13
Расширение функциональных возможностей статических преобразователей для асинхронных электроприводов И.А. Хайченко, В.В. Бабенко, Ю.В. Нефедов	25
Синтез управления в активных средствах адаптации деталей при автоматизированной сборке С.В. Кузнецова, А.Л. Симаков	31
Анализ влияния параметров модели Боука-Вена на форму петли гистерезиса Т.Ю. Заблочкая	40
Автоматическое формирование зоны контроля при управлении качеством производства стеклодротов с использованием технического зрения Ю.Н. Матвеев, М.М. Аль Окаби	48
Повышение надежности систем автоматического управления технологическими процессами А.К. Муконин, В.А. Медведев, В.А. Трубецкой, Д.А. Тонн, С.А. Горемыкин, Н.В. Ситников	56

Радиотехника и связь

Моделирование линейной антенной решетки для спутниковой связи современных телекоммуникационных систем С.А. Антипов, В.Н. Кострова, П.В. Николаев, Ю.Г. Пастернак, К.А. Разинкин, В.И. Чугуевский	64
Методика проектирования микрополосковых направленных ответвителей на встречно-штыревых структурах А.В. Останков, Н.Н. Щетинин, С.Ю. Дашян	70
Методика проектирования компараторов кода с учетом заданного базиса А.А. Пирогов, Ю.А. Пирогова, С.А. Гвозденко, Д.В. Шардаков, Б.И. Жилин	76
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	83
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	91
Методика проектирования преобразователей кода на базе ПЛИС А.А. Пирогов, Ю.А. Пирогова, С.А. Гвозденко, Б.И. Жилин, Э.В. Сёмка	96
Состояние и перспективы применения гиперспектральной аппаратуры для обнаружения и распознавания различных объектов И.П. Бостынец, В.И. Лопин, А.А. Рогозин, Г.Л. Тюрин	102

Исследование влияния типов проводниковых материалов на характеристики патч-антенны для сетей пятого поколения С.М. Фёдоров, А.С. Бадаев, Е.А. Ищенко, М.А. Сиваш.....	109
Сравнительный анализ программных комплексов для определения механических характеристик РЭС А.С. Костюков, А.В. Башкиров, М.Ю. Гостев, А.С. Демихова, Ю.А. Пирогова.....	117
Исследование геометрической трансформации микрополосковой линзы Ротмана для сокращения габаритных размеров С.А. Антипов, В.Н. Кострова, Ю.Г. Пастернак, К.А. Разинкин, М.А. Сиваш, В.И. Чугуевский.....	127

Машиностроение и машиноведение

Этапы разработки анимационного обеспечения робототехнического модуля О.И. Попова, Г.С. Абдуллаев, Г.Э. Оруджева, Н.М. Сулейманова, Р.А. Юсифов, М.И. Попова, А.В. Демидов.....	132
Разработка конструкции комбинированного электрода-инструмента, изготавливаемого аддитивным методом Е.В. Смоленцев, В.В. Куц, М.С. Разумов, Д.Е. Крохин.....	138
Повышение качества осесимметричных оболочек канала воздухозаборника самолета В.И. Максименков, М.В. Молод, В.И. Федосеев.....	146
Разработка и исследование нового оборудования для штамповки полых изделий из трубной заготовки А.Ю. Боташев, Р.А. Байрамуков, Н.У. Бисилов, Э.Х. Джуманазаров, Р.С. Малсугенов.....	150
Особенности взаимодействия микронеровностей контактирующих поверхностей при финишной антифрикционной безабразивной обработке Ю.А. Цеханов, М.Н. Подопрхин, И.В. Шепеленко, Я.Б. Немировский.....	157
Использование метода натурального эксперимента для оптимизации автоклавного производства Ю.В. Нефедов.....	167

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Development of special software for solution of transport tasks by modified genetic algorithm using free threading S.L. Podval'ny, D.A. Vdovin.....	7
Controlling a flexible inverted pendulum based on the singular perturbation method Z. Hatif Abbas.....	13
Expansion of functional capabilities of static converters for asynchronous electric drives I.A. Khaychenko, V.V. Babenko, Yu.V. Nefedov.....	25
Control synthesis in active means of part adaptation during automated assembly S.V. Kuznetsova, A.L. Simakov.....	31
Analysis of the Bouc-Wen model parameter effect on hysteresis loop T.Yu. Zablotskaya.....	40
Automatic formation of a control zone when controlling the quality of the production of glassworms with the use of technical vision Yu.N. Matveev, M.M. Alaqabi.....	48
Improving the reliability of automatic control systems for technological processes A.K. Mukonin, V.A. Medvedev, V.A. Trubetskoy, D.A. Tonn, S.A. Goremykin, N.V. Sitnikov.....	56

Radio engineering and communication

Modeling of a linear antenna array for satellite communication of modern telecommunication systems S.A. Antipov, V.N. Kostrova, P.V. Nikolaev, Yu.G. Pasternak, K.A. Razinkin, V.I. Chuguevskiy.....	64
Methodology of designing micro-strip directional couplers on interdigitated structures A.V. Ostankov, N.N. Shchetinin, S.Yu. Dachian.....	70
Method of designing code comparators taking into account a given logical basis A.A. Pirogov, Yu.A. Pirogova, S.A. Gvozdenko, D.V. Shardakov, B.I. Zhilin.....	76
Synthesis and analysis of one cylindrical lens based on parallel printed circuit boards with electrically small diffusers Yu.G. Pasternak, E.A. Rogozin, R.E. Rogozin, S.M. Fedorov.....	83
Investigation of the influence of the distance between antennas in MIMO antenna array for fifth generation communications S.A. Antipov, E.A. Ishchenko, V.N. Kostrova, K.A. Razinkin, D.A. Stezhkin, S.M. Fyedorov.....	91
Design methodology for code converters based on FPGA A.A. Pirogov, Yu.A. Pirogova, S.A. Gvozdenko, B.I. Zhilin, E.V. Syemka.....	96
State and application perspectives of hyperspectral equipment for detection and recognition of various objects I.P. Bostynets, V.I. Lopin, A.A. Rogozin, G.L. Tyurin.....	102

Study of the influence of types of conductor materials on the characteristics of the patch-antenna for the fifth generation communications S.M. Fyedorov, A.S. Badaev, E.A. Ishchenko, M.A. Sivash.....	109
Comparative analysis of software complexes for determination of mechanical characteristics of RED A.S. Kostyukov, A.V. Bashkirov, M.Yu. Gostev, A.S. Demikhova, Yu.A. Pirogova.....	117
Research of geometric transformation of a Rotman microstream lens for reducing overall dimensions S.A. Antipov, V.N. Kostrova, Yu.G. Pasternak, K.A. Razinkin, M.A. Sivash, V.I. Chuguevskiy.....	127

Mechanical engineering and science of machines

Stages of development of animation support of robotic module O.I. Popova, G.S. Abdullaev, G.E. Orudzheva, N.M. Suleymanova, R.A. Yusifov, M.I. Popova, A.V. Demidov.....	132
Development of the design of the combined electrode-tool manufactured by the additive method E.V. Smolentsev, V.V. Kuts, M.S. Razumov, D.E. Krokhin.....	138
Improving the quality of the aircraft air intake axisymmetric channel shells V.I. Maksimenkov, M.V. Molod, V.I. Fedoseev.....	146
Development and research of new equipment for stamping hollow products from a tube billet A.Yu. Botashev, R.A. Bayramukov, N.U. Bisilov, E.Kh. Dzhumanazarov, R.S. Malsugenov.	150
Peculiarities of interaction of microasperities of contacting surfaces during finishing anti-frictional abrasion-free treatment Yu.A. Tsekhanov, M.N. Podoprikin, I.V. Shepelenko, Ya.B. Nemirovskiy.....	157
Using the natural experimental method for optimization of autoclave production Yu.V. Nefedov.....	167

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.25987/VSTU.2020.16.4.001

УДК 004.4

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ЗАДАЧ МОДИФИЦИРОВАННЫМ ГЕНЕТИЧЕСКИМ АЛГОРИТМОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОПОТОЧНОСТИ

С.Л. Подвальный, Д.А. Вдовин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена проблема разработки специального программно-алгоритмического обеспечения для решения транспортных задач с использованием генетического алгоритма. Выбран критерий: минимизация времени обслуживания при ограничениях на ресурсы. По сравнению с традиционными генетическими алгоритмами потребовалось создание некоторого варианта модифицированного генетического алгоритма, в котором используется второй оператор мутации, для уменьшения вероятности попадания в локальный экстремум. Подробно рассмотрен алгоритм работы программного средства, которое позволяет произвести начальные настройки генетических операторов (размер популяции, количество итераций) и основные элементы эволюционного поиска (отбор, наследование кроссинговер, мутация), что особенно важно при решении задач большой размерности; сохранить полученные маршруты при повторном решении перемещения транспортного средства по заказчикам в сочетании с оперативно используемой базой данных как по заказчикам, так и по транспортным средствам. Программа разработана в среде программирования Microsoft Visual Studio 2017, а в качестве языка программирования использовался C Sharp. Представлен интерфейс программного средства. Для повышения эффективности использования процессора и, в частности, увеличения быстродействия при решении задач большой размерности были использованы элементы распараллеливания вычислительного процесса, в качестве которого выбран метод многопоточности. Показано, что благодаря такому подходу время поиска уменьшилось более чем в пять раз и сопоставимо со временем поиска другими методами, например роевыми

Ключевые слова: генетический алгоритм, программное средство, транспортная задача, многопоточность, эвристический алгоритм

Введение

Транспортировка различного количества груза является актуальной темой и на сегодняшний день в жизни современного человека. Решение таких задач увеличивает прибыль организаций и минимизирует издержку на транспортировку товаров. Поставленная задача является выполненной, если определённое количество груза достигло потребителя при определенных ограничениях. Для увеличения скорости и эффективности поиска лучшего решения применяются алгоритмы, которые выполняются на электронно-вычислительной машине. Разработка таких алгоритмов должна учитывать специфику аппаратного обеспечения компьютера.

Транспортные задачи (ТЗ) можно разделить на следующие типы:

- ТЗ по ограничению стоимости перевозок.
- ТЗ по ограничению времени.
- ТЗ на поиск кратчайшего расстояния по заданным точкам.

В данной статье будет рассмотрен второй тип задачи. Критерием завершенности выполне-

ния ТЗ будет считаться минимальное затраченное время на перевозку товара по заказчикам.

Одним из методов решения оптимизационных задач являются генетические алгоритмы (ГА), основанные на принципах естественного отбора Ч. Дарвина. Генетический алгоритм – это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию [1].

В статье рассматривается алгоритм работы программного средства, которое реализует поиск лучшего решения с помощью модифицированного ГА. Этот метод отличается от стандартного алгоритма тем, что использует второй оператор мутации. Благодаря ему поиск оптимального пути сократился в несколько раз, а также уменьшилась вероятность попасть в локальный минимум.

Программное средство (ПС) использует свойство многопоточности. Такой метод позволяет уменьшить время выполнения алгоритма за счет распределения нагрузки центрального процессора на отдельные потоки.

Данная статья посвящена разработке программного средства для решения ТЗ с ограничением по времени при помощи модифицированного генетического алгоритма.

Алгоритм работы программного средства

Для объяснения работы модифицированного генетического алгоритма в программном средстве необходимо ввести следующие обозначения:

- «max_iter» – переменная, обозначающая максимальное количество выполненных шагов алгоритма;
- «size_popul» – показывает количество маршрутов в популяции;

- «p_cross» – переменная, которая позволяет оператора кроссинговера в модифицированном ГА с определённой вероятностью;
- «p_mut» – переменная, значение которой показывает вероятность использования оператора мутации;
- «F_best_c» – лучшая целевая функция (ЦФ) на данном шаге поиска оптимального маршрута;
- «F_best_p» – ЦФ лучшего решения в популяции на предыдущей итерации алгоритма;
- «count_F» – количество шагов неизменяемых значений целевой функции;
- «i» – текущий шаг итерации алгоритма.

Модифицированный ГА для программного средства изображен на рис. 1.

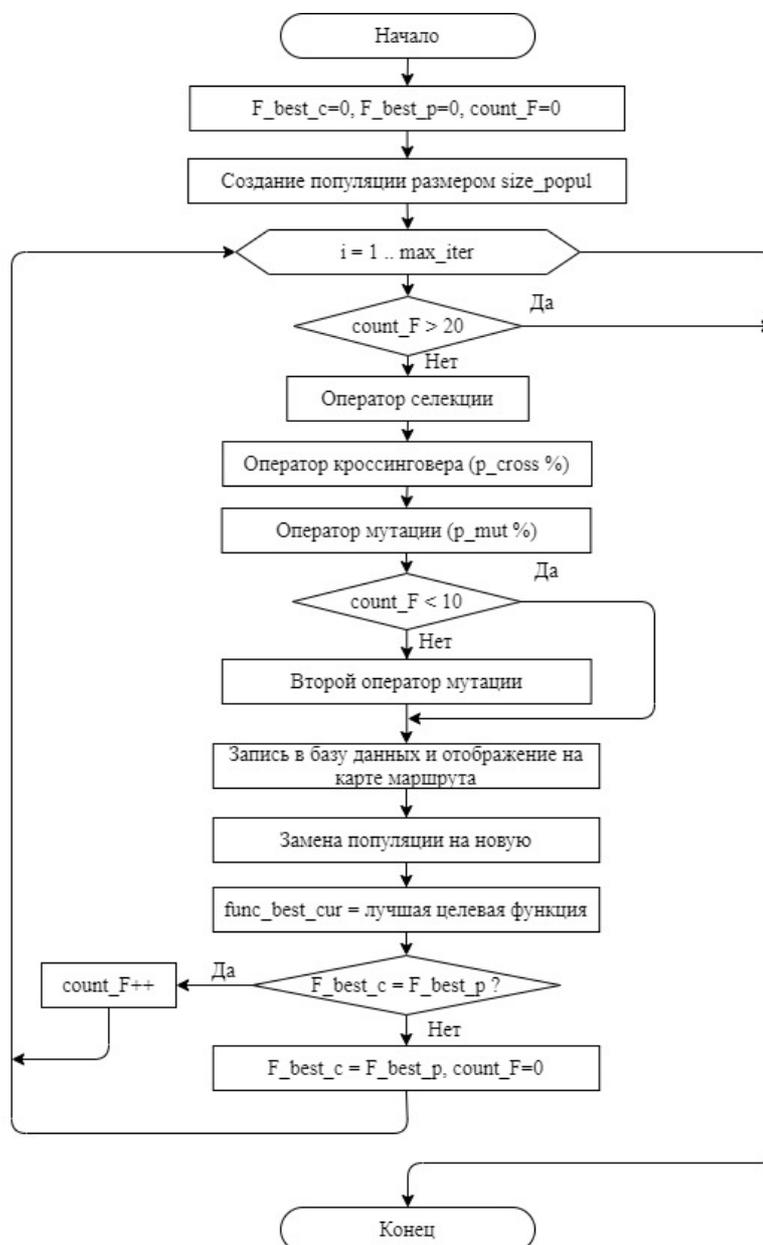


Рис. 1. Алгоритм работы программного средства

Во время запуска алгоритма необходимо обнулить переменные: «F_best_c», «F_best_p» и «count_F». Далее применяется оператор инициализации, т.е. создается массив решений (набор маршрутов) в количестве равным переменной «size_popul». На следующем шаге происходит сравнение шага «i» с максимальной возможной итерацией «max_iter». Если первая переменная превосходит вторую, то заканчивается выполнение алгоритма, иначе переходим к следующему шагу. Далее если количество неизменяемых решений «count» в течение десяти итераций будут одинаковые, то завершаем процесс алгоритма, иначе применяем оператор селекции. С заданной вероятностью «p_cross» применяется оператор кроссинговера. Аналогичным образом применяется первый оператор мутации (OM1). После, если число неизменившихся решений превосходит пять, то применяем второй оператор мутации (OM2), в противном случае оператор пропускается. Оператор OM2 способен разнообразить популяцию новыми маршрутами, тем самым обеспечивая выход из локального минимума, с которым не справляется оператор OM1. Далее решение необходимо записать в таблицу

«History» в базу данных для дальнейшего составления отчета, а также отобразить наглядно текущий маршрут на карте. Следом меняем старое решение на новое и присваиваем лучшую целевую функцию переменной «F_best_c». Если предыдущая лучшая ЦФ «F_best_pr» будет равна текущей, то прибавляем «count» на единицу, иначе приравняем их и обнуляем «count_F». Далее алгоритм будет выполняться до тех пор, пока либо не закончатся итерации, либо произойдет выход.

Интерфейс программного средства

Программное средство позволяет наглядно отображать заказчиков (точки на карте) и передвижение транспортного средства (ТС) от одного потребителя к другому (линия между двумя точками). Программа написана на языке C Sharp, среда разработки Microsoft Visual Studio 2017. Программа предназначена для запуска под операционными системами Windows 10 и выше. Главное окно программы «Решение ТЗ при помощи МГА» показано на рис. 2.

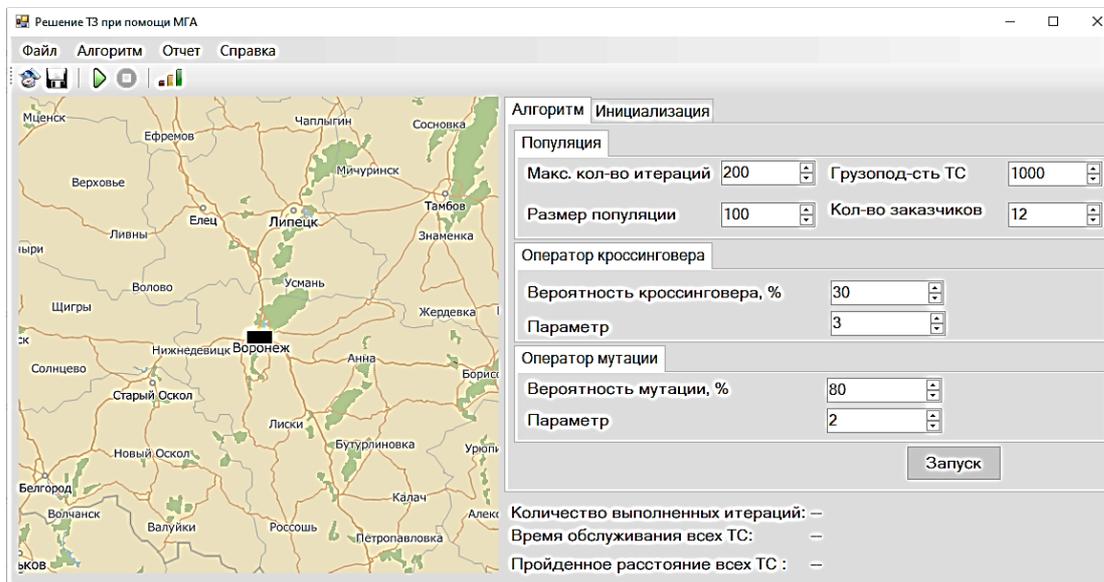


Рис. 2. Главное окно программного средства

Правая часть ПС предоставляет возможность настраивать различные параметры генетического алгоритма, тем самым повышается качество получаемого решения. Настройка различных параметров делится на три этапа: инициализация, оператор кроссинговера и мутации.

Размер популяции позволяет создавать нужное количество начальных решений (ген или хромосом). Большое количество выбора решений повышает вероятность выбора лучшего набора маршрутов. При достижении максимального числа итераций, указанного в поле, алгоритм выводит последний обработанный маршрут. Значение грузоподъемности акту-

ально для каждого ТС, выезжающего из склада. Параметр «Количество заказчиков» создает указанное количество строк для инициализации данных о каждом потребителе, а также это максимальное число, которое можно нанести на рабочую зону.

В поле «Оператор кроссинговера» настраиваются два параметра «Вероятность кроссинговера» и «Параметр». Первое поле показывает вероятность использования данного оператора в модифицированном алгоритме. Значение второго поля позволяет выбрать указанное количество маршрутов из поколения для дальнейшего применения на них оператора кроссинговера.

Оператор мутации и поля «вероятность мутации» и «Параметр» аналогичны оператору кроссинговера.

Вкладка «Инициализация» позволяет заполнить начальные данные о заказчиках, а именно: номер потребителя; верхнюю и нижнюю границу отправка ТС от заказчика; запрашиваемый вес товара; координаты «X» и «Y» заказчика; время, в которое можно обслужить текущего потребителя на транспортном средстве.

Левая часть программы представляет собой рабочую зону. Она необходима для установки клиентов на карту, а также для отображения маршрутов ТС со склада. Карта обновляется на каждой итерации алгоритма. В нижней части рабочей зоны отображаются: номер последней итерации, общее время обслуживания всех заказчиков и расстояние пройденных всех транспортных средств.

Разработка многопоточного алгоритма

Параллельное исполнение кода современного программного обеспечения реализуется, с одной стороны, аппаратными возможностями современных персональных компьютеров, а с другой – возможностями операционных систем, такими как процессная многозадачность и поточная многозадачность [3]. Процесс – это объект, который создаётся и контролируется операционной системой. Он обладает собственным адресным пространством и приоритетом выполнения на уровне операционной системы. Процессы могут взаимодействовать через сервисы операционной системы: сокеты, каналы и отправку сообщений. При этом надо отметить, что имеют место относительно высокие накладные расходы при передаче данных.

Поточная многозадачность опирается на понятие потока – изолированной последовательности команд, которые выполняются в рамках некоторого процесса. Поток управляется как самой программой, которая их формирует, так и операционной системой. Многопоточность позволяет процессу разделить алгоритм своей работы на отдельные параллельно исполняемые группы команд.

ГА является одним из лучших алгоритмов, который способен выполнять поиск лучшей целевой на параллельных процессах [27]. Разделение нагрузки на процессор осуществляется с помощью реализации обработки данных в разных процессах. Поток (в языке программирования C Sharp это библиотека «Thread») – это независимое последовательное выполнение набора команд и функций в ПС [2].

Алгоритм, позволяющий распараллелить вышеуказанные операции, представлен на рис. 3.

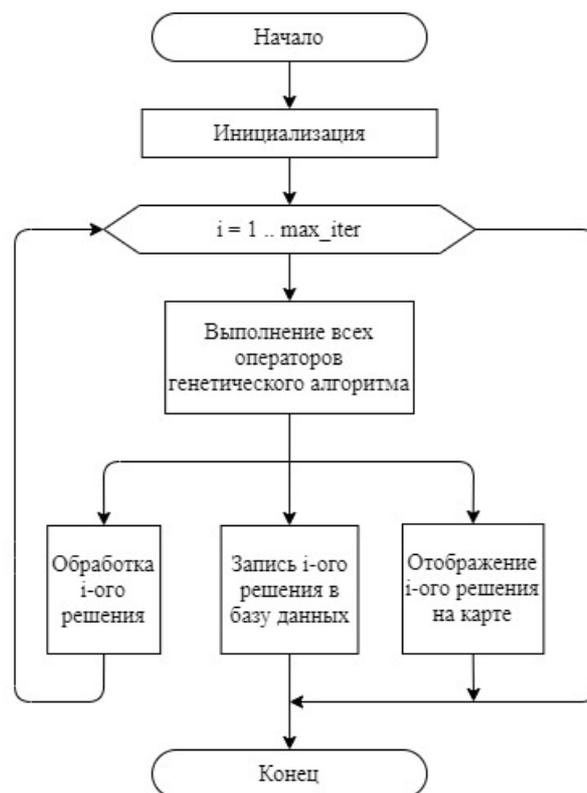


Рис. 3. Многопоточный алгоритм работы ПС

Запуск дополнительных потоков происходит после получения набора маршрута. Далее программа подразделяется на основной поток и два дополнительных. В первом продолжается обработка данных о маршрутах и оценивание целевой функции. В дополнительном потоке происходит запись получившейся популяции в

таблицу базы данных, а во втором – графическое построение популяции на текущей итерации, т.е. отображение передвижение ТС на карте. Вспомогательные потоки работают независимо от основного, тем самым уменьшается время на поиск лучшего решения.

В Visual Studio для использования функции многопоточного режима подключается библиотека «System.Threading». Для инициализации дополнительного потока используется класс «Thread».

Результаты

В статье [4] было проведено сравнение эвристических алгоритмов для поиска оптимального маршрута. Моделирование происходило в имитационной среде, а именно – AnyLogic.

Для сравнения были взяты результаты стандартного генетического алгоритма, а также были добавлены итоги многопоточного выполнения программного средства, но с небольшими преобразованиями. Изменения были следующие: убрана интеграция с базой данных SQL и количество ТС было уменьшено до одного. Эти преобразования были необходимы из-за начальных условий в статье [4], а также, чтобы результаты были приближенными к стандартному генетическому алгоритму.

График зависимостей времени вычисления маршрута от количества заказчиков для каждого из алгоритмов представлен на рис. 4.

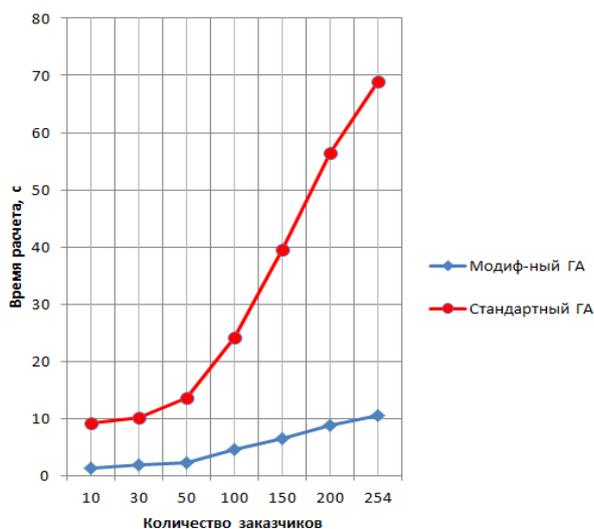


Рис. 4. Сравнение результатов генетических алгоритмов

По итогам стандартного и модифицированного ГА можно сказать, что разработанный алгоритм позволяет снизить время выполнения поиска лучшего пути приблизительно в 5 раз.

Заключение

В данной статье рассмотрен модифицированный ГА для решения транспортных задач с ограничениями во времени.

В статье представлен алгоритм работы программного средства для решения транспортных задач с ограничением по времени. На этапе разработки интерфейса программного средства была произведена интеграция с базой данных.

Разработанный алгоритм ПС позволяет реализовать поиск лучшего решения с большой размерностью, а также предотвращает попадание в локальный минимум.

Для увеличения быстродействия поиска оптимального пути передвижения ТС, а также записи в базу данных и отображения маршрутов был использован многопоточный метод. Такой режим во время сравнения показал уменьшенное время работы программы приблизительно в 5 раз, по сравнению со стандартным генетическим алгоритмом.

Литература

1. Кремер О.Б., Подвальный С.Л. Программная реализация решения оптимизационных задач методом генетического алгоритма // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 5. № 3. С. 21-24.
2. Денискин А.В. Многопоточность в языке программирования C Sharp // Academy. 2017. № 2. С. 21-24.
3. Соболев П.Ю., Филенко Е.С. Реализация многопоточности в современных языках программирования // Современные тенденции развития науки и образования: материалы междунар. (заоч.) науч.-практ. конф. Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2016. С. 14-19.
4. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера/ С.С. Семенов, А.В. Педан, В.С. Воловиков, И.С. Климов // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 116-131.

Поступила 28.06.2020; принята к публикации 17.08.2020

Информация об авторах

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

Вдовин Дмитрий Андреевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vdovin-vm@mail.ru

**DEVELOPMENT OF SPECIAL SOFTWARE FOR SOLUTION OF TRANSPORT TASKS
BY MODIFIED GENETIC ALGORITHM USING FREE THREADING**

S.L. Podval'ny, D.A. Vdovin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article solves the problem of developing special software and algorithmic software for solving transport problems using the genetic algorithm. Criterion selected: minimization of service time with resource constraints. Compared with traditional genetic algorithms, it was required to create some version of the modified genetic algorithm, which uses the second mutation operator, to reduce the probability of falling into a local extremum. The algorithm of the software tool's operation is considered in detail, which allows one to make initial settings for genetic operators (population size, number of iterations) and the basic elements of evolutionary search (selection, crossingover inheritance, mutation), and which is especially important when solving large-dimensional problems; save the received routes when re-deciding the movement of the vehicle according to customers in combination with an online database, both for customers and for vehicles. The program was developed in the Microsoft Visual Studio 2017 programming environment, and C sharp was used as the programming language. The software interface is presented. In order to increase the efficiency of processor utilization and, in particular, to increase performance when solving large-dimensional problems, we used elements of parallelization of the computing process, for which the multithreading method was chosen. It is shown in the work that thanks to this approach, the search time decreased by more than 5 times and is comparable with the search time by other methods, for example, by swarm ones

Key words: genetic algorithm, software, transportation task, free threading, heuristic algorithm

References

1. Kremer O.B., Podval'ny S.L. "Software implementation of optimization problems solutions using genetic algorithm", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 3, pp. 21–24.
2. Deniskin A.V. "Multithreading in the C Sharp programming language", Ivanovo, *Academy*, 2017, no 2, pp. 21-24.
3. Sobolev P.Yu., Filenko E.S. "Multithreading implementation in modern programming languages", *Proc. of the Intern. Sci. and Pract. Conf.: Modern Trends in the Development of Science and Education (Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya: materialy mezhdunar. (zaoch.) nauch.-prakt. konf.)*, Neftekamsk, Mir Nauki, 2016, pp. 14-19.
4. Semenov S.S., Pedan A.V., Volovikov V.S., Klimov I.S. "Analysis of the complexity of various algorithmic approaches to solve the traveling salesman problem", St. Petersburg, *Management, Communication and Security Systems (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2017, no 1, pp. 116-131.

Submitted 28.06.2020; revised 17.08.2020

Information about the authors

Semyen L. Podval'ny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394016, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel.: +7 (929) 011-21-53

Dmitriy A. Vdovin, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026 Russia), e-mail: vdovin-vm@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ГИБКИМ ПЕРЕВЕРНУТЫМ МАЯТНИКОМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СИНГУЛЯРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

З. Хатиф Аббас

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: приведены данные оригинального исследования, относящегося к тематическому направлению проектирования механических систем с помощью математического моделирования. Изучено управление гибким обратным маятником на основе метода сингулярных возмущений. Исследована система кинематики и динамики гибкого перевернутого маятника. Разработана модель системы гибкого перевернутого маятника на основе дифференциальных уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений с определенными геометрическими ограничениями. С целью уменьшения сложности модели произведено «разбиение» связанной динамики системы на составные части – медленную и быструю подсистемы – с помощью метода сингулярных возмущений. Для каждой из подсистем разработан соответствующий алгоритм управления. Репрессор, использующий принцип управления со скользящим режимом, разработан как часть более сложного механизма управления медленной подсистемы. Для быстрой подсистемы предложен простой алгоритм управления с обратной связью. За счет проведенных операций, в отличие от традиционных, разработанная модель является значительно более простой: граничные условия содержат только граничную информацию, что упрощает проектирование систем управления. На основе такой «составной» модели предложена методика граничного управления, которая позволяет одновременно отслеживать траекторию конечного эффектора и подавлять вибрацию. Получены результаты моделирования, которые доказывают эффективность методики граничного управления. Также моделирование продемонстрировало, что разработанная стратегия управления показывает высокие результаты в системе с помехами

Ключевые слова: гибкий обратный маятник, управление, сингулярные возмущения, метод, механические системы, математическая модель

Введение

До настоящего времени продолжает иметь место проблема управления гибким перевернутым маятником и его математического моделирования, не получившая надлежащего уровня разрешения [1-6]. При этом из ее главных аспектов является то, что для повышения надежности и управляемости систем необходимы соответствующие инструменты, позволяющие нейтрализовать вибрации или, как минимум, ограничить их в интервале допустимых значений. Приведенные обстоятельства доказывают актуальность настоящего исследования.

За последние годы вопросу управления гибкого маятника было посвящено несколько фундаментальных работ [1-6]. К примеру, были представлены модельные уравнения и разработана система управления гибким маятником («flexible inverted pendulum system», FIPS) на основе классического метода частотного анализа [7]. Для разработки модели системы гибкого маятника использовался метод Лагранжа и разработан регулятор на основе ли-

нейного метода анализа в пространстве состояний [8-10]. Также была предложена модель, являющаяся аппроксимацией гибкого маятника [11].

Метод сингулярных возмущений традиционно использовался для моделирования процессов, протекающих в различных масштабах времени. В его рамках возникновение быстрых и медленных движений объяснялось следствием воздействия внешних факторов. Этот метод позволяет упростить модель (если пренебречь быстрыми движениями), при этом рассмотрение быстрых движений в пограничном слое, рассчитанных в отдельных временных масштабах, может улучшить аппроксимацию модели [12,13].

В большинстве разработанных методов управления использование метода сингулярных возмущений приводило к редукции модели, т.е. к игнорированию высоких частот системы [14]. В результате были разработаны методы множественных временных шкал для различных алгоритмов управления, например – алгоритмов обратной связи, обратной связи по состоянию и др.

Метод сингулярных возмущений оказался полезным для анализа систем с обратной свя-

зью с высоким коэффициентом усиления, управления динамическими сетями, а также для линейных и нелинейных динамических систем. Сингулярные возмущения и временные шкалы в теории управления и ее прикладных аспектах также были предметом серьезных исследований [15-17].

Многие исследователи разработали стратегии управления для гибких манипуляторов на основе динамической модели уравнений в частных производных, которая была получена без какого-либо усечения, что позволяет ей точно представлять состояния, изменяющиеся в пространстве-времени.

В известных исследованиях [18-20] для регулирования связи вдоль желаемой траектории был разработан связанный алгоритм управления в скользящем режиме. Была рассмотрена граничная управляющая сила («boundary control force») на свободном конце маятникового стержня и исследована равномерность и устойчивость системы управления. Однако до настоящего времени модели управления FIPS являлись неоптимальными – за счет их высокой сложности проектирование систем управления также оставалось сложным. В настоящий момент времени обращают на себя внимание предложения простых совмещенных систем управления, основанных на динамических моделях, которые состоят из дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) и обыкновенных дифференциальных уравнений (ODE) с определенными геометрическими ограничениями. Тем не менее, при современном уровне техники этот подход не проработан до конца. Решение данного аспекта проблемы управления гибким обратным маятником детерминирует актуальность настоящего исследования.

Цель исследования

Реализация управления гибким обратным маятником с помощью метода сингулярных возмущений.

Научная новизна

В отношении системы обратного гибкого маятника:

1. Разработана новая модель на основе комплекса дифференциальных уравнений в частных производных и обыкновенных диф-

ференциальных уравнений с определенными геометрическими ограничениями.

2. Достигнуто уменьшение сложности модели с помощью метода сингулярных возмущений. В составе системы обратного гибкого маятника выделены медленная и быстрая подсистемы.

3. Разработан репрессор, использующий принцип управления со скользящим режимом, как часть более сложного механизма управления медленной подсистемы.

4. Предложен простой алгоритм управления с обратной связью для быстрой подсистемы.

5. За счет упрощения модели достигнуто упрощение проектирования систем управления.

Модель системы гибкого перевернутого маятника

В настоящем исследовании рассматривается гибкий обратный маятник с грузом в верхней точке, в предположении того, что его плотность относительно мала. В рассматриваемой системе, в отличие от классической модели, учитываются вибрационные составляющие. Рассматривается FIPS, который движется только в вертикальной плоскости. Конфигурация этого устройства показана на рис. 1.

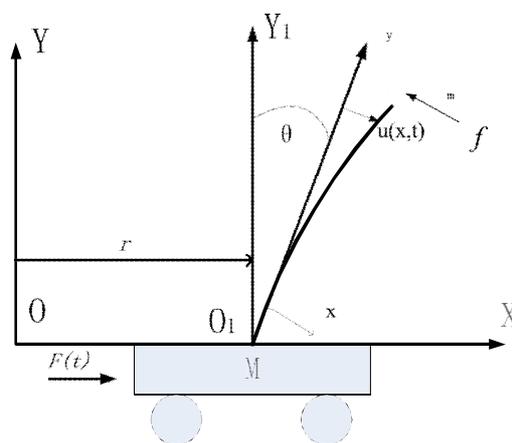


Рис. 1. Модель системы гибкого перевернутого маятника

На нем приведено изображение гибкого перевернутого маятника, который состоит из гибкого стержня и движется только в направлении X. На конце стержня есть нагрузка, а на конце маятника – регулятор, где:

f - граничный вход,

M – эквивалентная масса системы в неподвижном состоянии,

ρ – плотность упругого стержня перевернутого маятника,

m – груз на конце перевернутого маятника.

L – длина упругого перевернутого маятника,

F – управляющий входной сигнал,

E – модуль Юнга,

I – момент сечения,

θ – угловое положение звена,

$u(x, t)$ – внешнее отклонение точки x на рычаге,

J – инерция соединения,

$u(x, t)$ и $u_x(x, t)$ представляют соответственно $(\partial/\partial t)u(x, t)$ и $(\partial/\partial x)u(x, t)$.

Кинематическая модель гибкого стержня определяется следующим образом:

Ось X : $P_{0x} = r + x \sin \theta + u(x, t) \cos \theta$

Ось Y : $P_{0y} = x \cos \theta - u(x, t) \sin \theta$

Кинетическая энергия FIPS:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{r}^2 + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} \rho \int_0^L \dot{P}_0^T \dot{P}_0 dx + \frac{1}{2} m \dot{P}_{0L}^T \dot{P}_{0L} \quad (1)$$

Формула потенциальной энергии гибкого перевернутого маятника:

$$V = \rho g \int_0^L (x \cos \theta - u(x, t) \sin \theta) dx + \frac{1}{2} EI \int_0^L (u_{xx}(x, t))^2 dx + mg(L \cos \theta - u(L, t) \sin \theta) \quad (2)$$

Неконсервативная работа колебательной системы:

$$\delta W_{nc} = F \delta r + f \delta u(L, t) \quad (3)$$

Для построения динамической модели системы гибкого перевернутого маятника мы применяем расширенный принцип Гамильтона:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T - \delta V + \delta W_{nc}) dt = 0, \quad (4)$$

где t_1, t_2 – две постоянные времени; $\dot{}$ принадлежит $[t_1, t_2]$ – время работы; и $\delta T, \delta V, \delta W_{nc}$ – изменение кинетической энергии, потенциальной энергии и неконсервативной работы соответственно. Затем, после уточняющих расчетов, динамическая модель FIPS в виде дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) определяется как:

$$-\rho(\ddot{u}(x, t) + x\ddot{\theta} + \dot{\theta} - g\theta) - EI u_{xxxx}(x, t) = 0 \quad (5)$$

$$m(\ddot{u}(L, t) + L\ddot{\theta} + \dot{\theta} - g\theta) - EI u_{xxxx}(L, t) - f = 0 \quad (6)$$

$$u_{xx}(L, t) = 0 \quad (7)$$

$$(J + mL^2 + \rho L \frac{L^2}{2}) \ddot{\theta} + (mL + \rho L \frac{L}{2}) \dot{\theta} - (mL + \rho L \frac{L}{2}) g\theta + m\{L\ddot{u}(L, t) - gu(L, t)\} + \rho \int_0^L (x\ddot{u}(x, t) - gu(x, t)) dx = 0 \quad (8)$$

$$(M + m + \rho L) \ddot{r} + (mL + \rho L \frac{L}{2}) \ddot{\theta} - m\ddot{u}(L, t) + \rho \int_0^L \ddot{u}(x, t) dx - F = 0 \quad (9)$$

$$u(0, t) = 0 \quad (10)$$

$$u_x(0, t) = 0 \quad (11)$$

Необходимо уточнить, что в динамической модели (5) - (11) динамика жесткого маятника в основном представлена уравнениями (8) и (9), а гибкого маятника – определяющим PDE (5) с граничными условиями, заданными обычными дифференциальными уравнениями (ODE) (6) - (7) и (10) - (11), где (10) - (11) - граничные условия на закрепленных концах звеньев.

Разделение связанной динамики гибкого перевернутого маятника с помощью метода сингулярных возмущений

Полная система. Управление системой FIP представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку её общая динамика включает как гибкую / упругую, так и жесткую составляющие. Традиционные методы моделирования увеличивают порядок модели. Чтобы уменьшить ее сложность, целесообразно «разбить» динамику системы на медленную и быструю подсистемы с помощью метода сингулярных возмущений.

В рамках указанного подхода, оказалось сложно выбрать параметр возмущения. В настоящем исследовании выбран параметр ε^2 , поскольку он позволяет изменить порядок модели динамики системы. Параметр ε^2 зависит от параметров системы. Таким образом, параметр $\frac{EI}{\rho}$ в уравнении может быть переопределен следующим образом:

$$\frac{EI}{\rho} = \alpha K \quad (12)$$

Поперечная вибрация u относительно системной переменной происходит в медленном масштабе времени в короткие сроки. Следовательно, необходимо ввести новую переменную $w(x, t)$ в том же порядке системы, который можно менять с помощью следующего уравнения:

$$u(x, t) = \varepsilon^2 w(x, t) \quad (13)$$

где $\varepsilon^2 = \frac{1}{K}$ является параметром возмущения.

Используя (13), создается возможность переписать модель жестких колебательных движений FIPS следующим образом:

$$-(\varepsilon^2 \ddot{w}(x, t) + x\ddot{\theta} + \dot{r} - g\theta) - \alpha w_{xxxx}(x, t) = 0 \quad (14)$$

$$m(\varepsilon^2 \ddot{w}(L, t) + L\ddot{\theta} + \dot{r} - g\theta) - EI\varepsilon^2 w_{xxxx}(L, t) - f = 0 \quad (15)$$

$$\varepsilon^2 w_{xx}(L, t) = 0 \quad (16)$$

$$\varepsilon^2 w(0, t) = 0 \quad (17)$$

$$\varepsilon^2 w_x(0, t) = 0 \quad (18)$$

$$(J + mL^2 + \rho L \frac{L^2}{3}) \ddot{\theta} + (mL + \rho L \frac{L}{2}) \dot{r} - (mL + \rho L \frac{L}{2}) g\theta + m(L\varepsilon^2 \ddot{w}(L, t) - g\varepsilon^2 u(L, t)) + \rho \int_0^L (x\varepsilon^2 u(x, t) - g\varepsilon^2 u(x, t)) dx = 0 \quad (19)$$

$$(M + m + \rho L) \dot{r} + (mL + \rho L \frac{L}{2}) \ddot{\theta} + m(\varepsilon^2 \ddot{w}(L, t)) + \rho \int_0^L (\varepsilon^2 \ddot{w}(x, t)) dx - f = 0 \quad (20)$$

Соответственно, используя (12) и (13), (6) можно переписать как:

$$-(\varepsilon^2 \ddot{w}(x, t) + x\ddot{\theta} + \dot{r} - g\theta) - \alpha w_{xxxx}(x, t) = 0 \quad (21)$$

Уравнения (14) – (20) представляют форму сингулярного возмущения, которая будет включена в систему уравнений динамики (5) – (11).

Благодаря применению параметра ε^2 полная система состоит из двух моделей движения в разных временных масштабах. Таким образом, медленная и быстрая подсистемы, представленные в этом разделе, были получены с помощью стандартных шагов метода сингулярных возмущений.

Медленная подсистема. Первоначально модель динамики жестких колебаний стержня, построенная по методу сингулярных возмущений, будет преобразована в модель жестких колебаний, не включающую каких-либо гибких параметров («flexible parameters»), а затем будет включена в уравнения (19) и (20), которые образуют медленную подсистему. Аналогично, после применения обычных процедур метода сингулярных возмущений, из уравнения (14) будет получена быстрая подсистема.

Установив в уравнениях (19) и (20) значение $\varepsilon = 0$, мы получаем модель жесткой динамики стержня, представленную в компактной форме:

$$(J + mL^2 + \rho L \frac{L^2}{3}) \ddot{\theta} + (mL + \rho L \frac{L}{2}) \dot{r} - (mL + \rho L \frac{L}{2}) g\theta = 0 \quad (22)$$

$$(M + m + \rho L) \dot{r} + (mL + \rho L \frac{L}{2}) \ddot{\theta} - F_x = 0 \quad (23)$$

Уравнение движения для поперечной вибрации стержня (14) принимает вид:

$$-(x\ddot{\theta} + \dot{r} - g\theta) - \alpha w_{xxxx}(x, t) = 0 \quad (24)$$

При этом граничное уравнение («boundary equation») принимает вид:

$$m(L\ddot{\theta} + \dot{r} - g\theta) - \rho \alpha w_{xxxx}(L, t) - f_s = 0 \quad (25)$$

Медленная подсистема, заданная в уравнениях (22) и (23), представляет собой модель жесткого движения без привлечения каких-либо мягких параметров.

Быстрая подсистема. Уравнение (14) представляет собой модель возмущенного упругого движения, полученную с параметром возмущения ε , который очень мал и зависит исключительно от E, I и ρ .

Для анализа динамического поведения быстрой подсистемы ускоренный временной масштаб определяется как $\tau = \frac{t-t_0}{\varepsilon}$. Его можно определить, убедившись, что медленные переменные в ускоренных временных масштабах остаются постоянными. Применяя стандартные процедуры метода сингулярных возмущений, можно определить быструю переменную w_f следующим образом:

$$w_f - w = w_s \quad (26)$$

где индекс f используется для описания переменных в ускоренном временном масштабе / быстром времени / ускоренной шкалы времени.

Дифференцирование ускоренной шкалы времени / быстрого времени дает:

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{1}{\varepsilon} \quad (27)$$

Учитывая (26) и (27), получаем:

$$w = w_s + \frac{d}{dt} w_f = w_s + \frac{dw}{dt} \frac{d}{d\tau} w_f = w_s + \frac{1}{\varepsilon} \hat{w}_f, \quad (28)$$

где \hat{w}_f обозначает производную по времени в ускоренном временном масштабе.

Снова дифференцируя (28), становится возможным получить:

$$\ddot{w} = \ddot{w}_s + \frac{d}{dt} \hat{w}_f = \ddot{w}_s + \frac{dw}{dt} \frac{d}{d\tau} \hat{w}_f = \ddot{w}_s + \frac{1}{\varepsilon^2} \ddot{w}_f \quad (29)$$

С учетом (29) уравнение (14) может принять вид:

$$\varepsilon^2 (\ddot{w}_s + \frac{1}{\varepsilon^2} \ddot{w}_f) + x\ddot{\theta} + \dot{r} - g\theta - \alpha (w_{xxxx}(x, t) + w_{fxxxx}(x, t)) = 0 \quad (30)$$

С учетом (24) (30) может принять вид:

$$-\left(\varepsilon^2 \left(\ddot{w}_s + \frac{1}{\varepsilon^2} \ddot{w}_f\right)\right) - a \left(w_{fxxxx}(x, t)\right) = 0 \quad (31)$$

Тем не менее, медленная переменная w_s постоянна в ускоренном временном масштабе, что подразумевает $\ddot{w}_s = 0$ и $\varepsilon = 0$. Следовательно, динамика в ускоренном временном масштабе может быть представлена как:

$$-\ddot{w}_f - a w_{fxxxx}(x, t) = 0 \quad (32)$$

С учетом (29) (15) может принять вид:

$$m \left(\varepsilon^2 \left(\ddot{w}_s(L, t) + \frac{1}{\varepsilon^2} \ddot{w}_f(L, t)\right) + L\ddot{\theta} + \dot{\tau} - g\dot{\theta}\right) - E I_x^2 \left(w_{fxxxx}(L, t)\right) - (f_f + f_s) = 0 \quad (33)$$

Применив (25) и (33), получаем:

$$m \left(\ddot{w}_f(L, t)\right) - \rho a w_{fxxxx}(L, t) - f_f \quad (34)$$

Вводя уравнение (29) в уравнения (16) – (18), можем получить:

$$w_{fxx}(L, t) = 0 \quad (35)$$

$$w_f(0, t) = 0 \quad (36)$$

$$w_{fx}(0, t) = 0 \quad (37)$$

Уравнение (34) представляет быструю подсистему в ускоренном временном масштабе, который учитывает вибрацию гибкого объекта.

Таким образом, на настоящем этапе исследования достигнуто упрощение системы на основе метода сингулярных возмущений, при этом модель динамики сцепления системы раскладывается на медленную подсистему с жесткими колебаниями, выраженную через линейные, и ускоренную подсистему с гибкими (мягкими, эластичными) колебаниями, выраженную через уравнения в частных производных. По сравнению с традиционной моделью трудность управления в упрощенной модели принципиально снижается.

Анализ и разработка системы управления гибким обратным маятником

Ключевым моментом при разработке алгоритма управления является то, что он должен быть способен обрабатывать неопределенные параметры жесткой модели и гибкого стержня. Кроме того, он должен обеспечивать экспоненциальную схожесть медленной и быстрой подсистем [21-25].

Учитывая эти факты, на данном этапе исследования был разработан регулятор, основанный на принципе управления со скользящим режимом, который является частью составной (сложной) схемы управления медленной подсистемой. Для быстрой подсистемы предлагается простой алгоритм управления с обратной связью. В качестве обоснования составной схемы управления предлагается экспоненциальный анализ устойчивости медленных и быстрых подсистем.

Алгоритм управления для медленной подсистемы. Из-за наличия ошибок моделирования и неизвестных нарушений / помех регулятор должен иметь высокую надежность. Управление в скользящем режиме является типичным методом, который обеспечивает надежность контроля. В скользящем режиме система не чувствительна к внешним помехам и параметрическим неопределенностям. Поэтому в данном исследовании разработка регулятора осуществлялась на базе метода управления в скользящем режиме.

С учетом неопределенностей и помех медленная подсистема, описываемая уравнениями (22), (23), принимает следующий вид:

$$\dot{x} = Ax + B(u + d(t)) \quad (38)$$

где $x = [\theta, \dot{\theta}, \tau, \dot{\tau}]$ и $|d(t)| < D$.

Поверхность скольжения («sliding surface») определяется следующим образом:

$$s = B^T P x = 0 \quad (39)$$

где $P = P^T > 0$.

Регулятор описывается следующим образом:

$$u(t) = u_{sq} + u_n \quad (40)$$

$$u_{sq} = -(B^T P B)^{-1} B^T P A_x(t) \quad (41)$$

$$u_n = -(B^T P B)^{-1} [B^T P B |D + kesi] sat(s), \quad (42)$$

где $sat(s)$ является функцией насыщения и определяется как $sat(s) =$

$$\begin{cases} 1 & s > \Delta \\ ks & |s| \leq \Delta, k = 1/\Delta \\ -1 & s < -\Delta \end{cases}$$

Здесь Δ – «пограничный слой».

Доказательство 1. Функция Ляпунова была выбрана в следующем виде:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2}s^2, \quad \text{где:} \\ \dot{s} &= B^T P \dot{x}(t) - B^T P (Ax + B(u + d(t))) \\ &= B^T P Ax(t) + B^T P Bu + B^T P B d(t) \\ &= B^T P Ax(t) + B^T P B (- (B^T P B)^{-1} B^T P Ax(t) \\ &\quad - (B^T P B)^{-1} [(B^T P B)D + kesi] \text{sat}(s)) \\ &+ B^T P B d(t) = \\ &= - [(B^T P B)D + kesi] \text{sat}(s) + B^T P B d(t) \end{aligned}$$

Следовательно:

$$\dot{V} = s\dot{s} = - [(B^T P B)D + kesi] s \cdot \text{sat}(s) \leq 0 \quad (43)$$

Для обеспечения хорошей работы поверхности скольжения замкнутой системы функция скользящей поверхности P была построена с помощью метода ЛМН (линейных матричных неравенств).

Затем была выведена формула общего алгоритма управления («control law»):

$$u(t) = -K_0 x + v(t) \quad (44)$$

$$v(t) = K_0 x + u_{eq} + u_n \quad (45)$$

$$\text{где } \dot{x}(t) = Ax(t) + B(v + d(t)) \quad (46)$$

$\bar{A} = A - BK_0$ и K_0 вводятся для соответствия требованию устойчивости Гурвица. Таким образом, медленная подсистема имеет стабильность как замкнутая система.

Доказательство 2:

$$V = x^T P x = 2x^T P Ax(t) + 2x^T P B(v + d(t)) \quad (47)$$

Полученная из анализа доказательства 1 функция скользящей поверхности s для ограниченного периода времени сходится к нулю, то есть $s = 0$, и уравнение (47) принимает вид:

$$V = x^T P x = 2x^T P \bar{A} x(t) + 2x^T P B(v + d(t)) \quad (48)$$

Чтобы гарантировать, что $\dot{V} < 0$, должно выполняться следующее условие:

$$P \bar{A} + \bar{A}^T < 0 \quad (49)$$

Для того чтобы облегчить применение метода ЛМН, формула (49) была преобразована следующим образом:

$$(A - BK_0)P^{-1} + P^{-1}(A - BK_0)^T < 0 \quad (50)$$

$$AP^{-1} + P^{-1}A^T < BL + L^T B^T \quad (51)$$

Затем неравенство (51) решается с помощью метода ЛМН.

Алгоритм управления для быстрой подсистемы. В этом исследовании мы рассматриваем устойчивость гибкого стержня. Считается, что стержень закреплен на одном конце и свободен на другом. К свободному концу прикреплен груз. Граничный регулятор с обратной связью описан следующим образом:

$$f_f = -\alpha \hat{w}_f(L, v) + \rho \alpha \beta \hat{w}_{f,xxx}(L, v) \quad (52)$$

Для доказательства устойчивости / стабильности быстрой подсистемы согласно формуле регулятора (52) функция Ляпунова определяется следующим образом.

Доказательство.

Шаг 1:

$$E(v) = \int_0^L (\beta I w_{f,xx}^2 + \rho \hat{w}_f^2) dx + K_1 (-\rho \alpha w_{f,xxx}(L, v) + \frac{m}{\beta} \hat{w}_f(L, v))^2 \quad (53)$$

$$\left(\rho \alpha \hat{w}_{f,xxx}(L, v) + \frac{m}{\beta} \hat{w}_f(L, v) \right)$$

$$E(v) = 2 \int_0^L (w_{f,xx} \hat{w}_{f,xx} + \hat{w}_f \hat{w}_f) dx$$

$$+ K_1 (-\rho \alpha w_{f,xxx}(L, v) + \frac{m}{\beta} \hat{w}_f(L, v))^2$$

$$- - \frac{2K_1(\rho\alpha)^2}{\beta} w_{f,xxx}^2(L, v) - \frac{2K_1 m \alpha}{\beta^2} \hat{w}_f^2(L, v) \leq 0 \quad (54)$$

Затем, после некоторых расчетов, K_1 определяется следующим образом:

$$K_1 - \frac{\beta^2}{(m + \alpha\beta)\rho} > 0 \quad (55)$$

Шаг 2: Функция Ляпунова имеет следующий вид:

$$V(v) = vE(v) + \int_0^L x \hat{W}_f(x, v) W_{f,xx}(x, v) dx, \quad (56)$$

Дифференцирование (55) в быстром времени / временном масштабе дает:

$$\begin{aligned} \dot{V}(v) &= E(v) + v\dot{E}(v) + \int_0^L \alpha x \hat{w}_f(x, v) \hat{w}_{f,xx}(x, v) dx \\ &- \int_0^L x w_{f,xxx}(x, v) w_{f,xx}(x, v) dx - \int_0^L (\alpha w_{f,xx}^2 + \hat{w}_f^2) dx \\ &+ K_1 (-\rho \alpha w_{f,xxx}(L, v) + \frac{m}{\beta} \hat{w}_f(L, v))^2 \\ &+ v \left(-\frac{2K_1(\rho\alpha)^2}{\beta} w_{f,xxx}^2(L, v) - \frac{2K_1 m \alpha}{\beta^2} \hat{w}_f^2(L, v) \right) \\ &- I w_{f,xx}(L, v) w_{f,xxx}(L, v) - \frac{3}{2} \int_0^L w_{f,xx}^2(x, v) dx \\ &+ \frac{\alpha L}{2} \hat{w}_f^2(L, v) - \frac{\alpha}{2} \int_0^L \hat{w}_f^2(x, v) dx \end{aligned} \quad (57)$$

Используя неравенство Коши-Шварца, получаем следующее выражение:

$$(-\rho a w_{fxxx}(L, v) + \frac{m}{\beta} \hat{w}_f(L, v))^2 \leq 2((\rho a)^2 w_{fxxx}^2(L, v) + 2 \frac{m^2}{\beta^2} \hat{w}_f^2(L, v)) \quad (58)$$

$$w_{fxx}^2(L, v) < \int_0^L w_{fxxx}^2(x, v) dx \quad (59)$$

$$w_{fx}(L, v) w_{fxxx}(L, v) \leq \delta_1 w_{fxx}^2(L, v) + \frac{1}{\delta_1} w_{fxxx}^2(L, v) \quad (60)$$

Соответственно, используя (58)–(60), выражение (57) можно переписать как:

$$\begin{aligned} & -\left(\frac{2K_1(\rho a)^2 v}{\beta} - K_1(\rho a)^2 - \frac{L}{\delta_1}\right) w_{fxxx}^2(L, v) \\ & \hat{V}(v) \leq -(1 - \delta_1) \int_0^L (a w_{fxxx}^2 + \hat{w}_f^2) dx \\ & -\left(\frac{2K_1 m a v}{\beta^2} - \frac{aL}{2} - \frac{K_1 m^2}{\beta^2}\right) \hat{w}_f^2(L, v) \end{aligned}$$

Затем выбирается параметр, который бы удовлетворял следующему неравенству:

$$\begin{cases} 1 - \delta_1 \geq 0 \\ \frac{2K_1(\rho a)^2 v}{\beta} - K_1(\rho a)^2 - \frac{L}{\delta_1} \geq 0 \\ \frac{2K_1 m a v}{\beta^2} - \frac{aL}{2} - \frac{K_1 m^2}{\beta^2} \geq 0 \end{cases}$$

Затем $\hat{V}(v) \leq 0$.

Из (56) возможно получить:

$$(v - C)E(v) \leq V(v) \leq (v + C)E(v) \quad (61)$$

где C – положительная константа.

Затем (61) принимает вид:

$$E(v) < V(v)(v - C) < (v + C)E(v)(v - C), \quad (62)$$

$$v > \max \left\{ \frac{\beta(K_1(\rho a)^2 + \frac{L}{\delta_1})}{2K_1(\rho a)^2}, \frac{\beta^2(\frac{aL}{2} + \frac{K_1 m^2}{\beta^2})}{2K_1 m a} \right\}$$

где $\hat{V}(v) \leq 0$

Когда $T > v$, уравнение (62) принимает вид:

$$E(v) \leq \frac{V(T)}{(v-C)} \leq \frac{(T+C)E(0)}{(v-C)} \quad (63)$$

Интегрируя приведенное выше уравнение, (63) принимает вид:

$$\int_T^\infty E(v)^2 dv \leq \int_T^\infty \frac{(v+C)^2 E(0)^2}{(v-C)^2} dv, \quad (64)$$

что подтверждает экспоненциальную устойчивость, как указано в (52). Следовательно, доказательство получено.

Результаты моделирования

С целью проверки и визуализации эффективности предложенного регулятора произведено программное моделирование в системе MATLAB.

Шаг по времени и шаг по пространству в программе были установлены следующим образом: $dt = 0,0001$ с и $dx = 0,06$ м.

Параметры FIPS: $EI = 2Nm^2$, $J = 0,05$ кгм², $M = 1$ кг, $m = 0,1$ кг, $\rho = 2$ кг/м, $L = 0,6$ м.

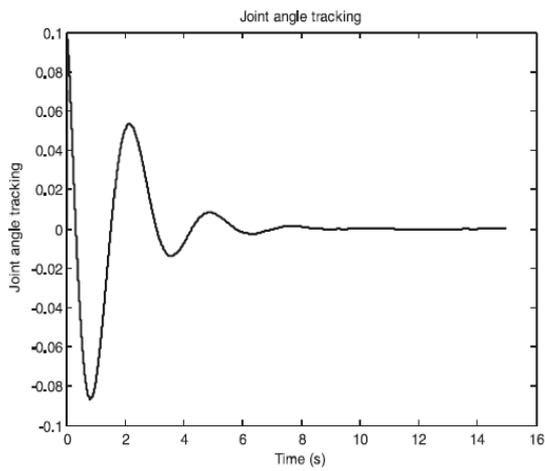
Параметры регулятора: $\alpha = 1$, $\beta = 0,1$, $a = 0,02$, $K = 100$.

$$P = \begin{bmatrix} 0.1993 & 0.0304 & 0.0322 & 0.0261 \\ 0.0304 & 0.0158 & 0.0061 & 0.0105 \\ 0.0322 & 0.0061 & 0.0126 & 0.0061 \\ 0.0261 & 0.0105 & 0.0061 & 0.0108 \end{bmatrix}, \Delta = 0.05, \text{kes}l = 0.5.$$

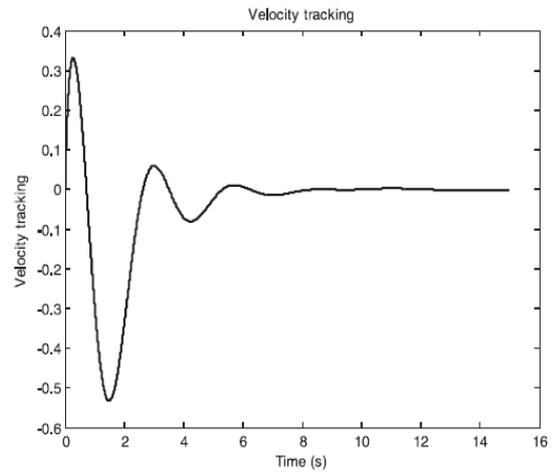
В начале моделирования начальная ориентация угла стыка была установлена на 0.1, и смещение позиции было равно 0.5. Следует обратить внимание на то, что отклонения вызваны движениями. Явилось рациональным установить нулевые начальные значения распределенного отклонения гибкого стержня. Для того чтобы проверить надежность регулятора, мы использовали возмущение со значением $0.05 \sin(t)$. Результаты моделирования (угол маятника, угловая скорость и скорость изменения положения маятника, медленный и быстрый вход регулятора) представлены на рис. 2.

Отклонения, связанные с гибкостью стержня, и граничное регулирование гибкого маятника представлены на рис. 3.

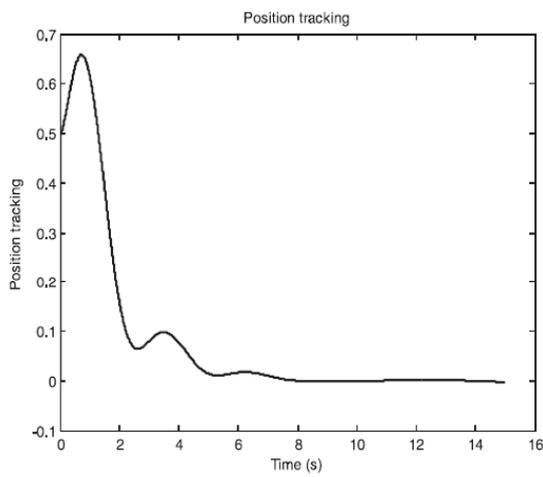
Эластичное отклонение гибкого маятника без граничного контроля представлено на рис. 4.



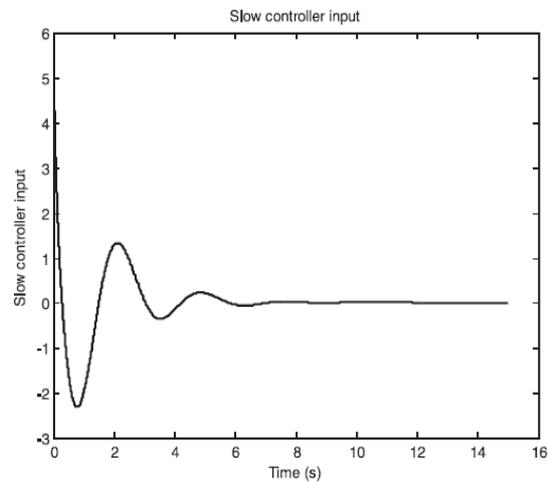
изменение общего соединения угла



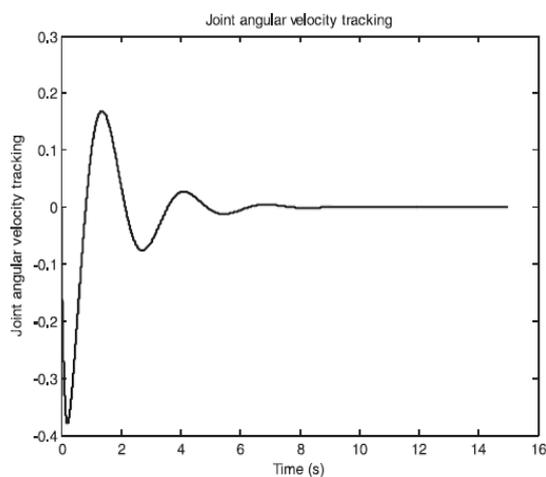
изменение скорости



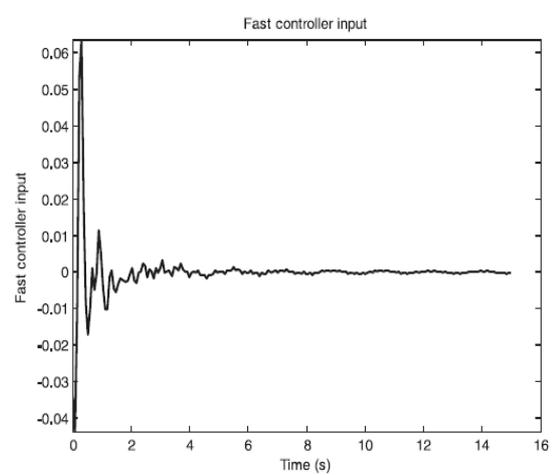
изменение позиции



медленный вход регулятора



изменение угловой скорости



быстрый вход регулятора

Рис. 2. Результаты моделирования системы гибкого перевернутого маятника по ключевым параметрам

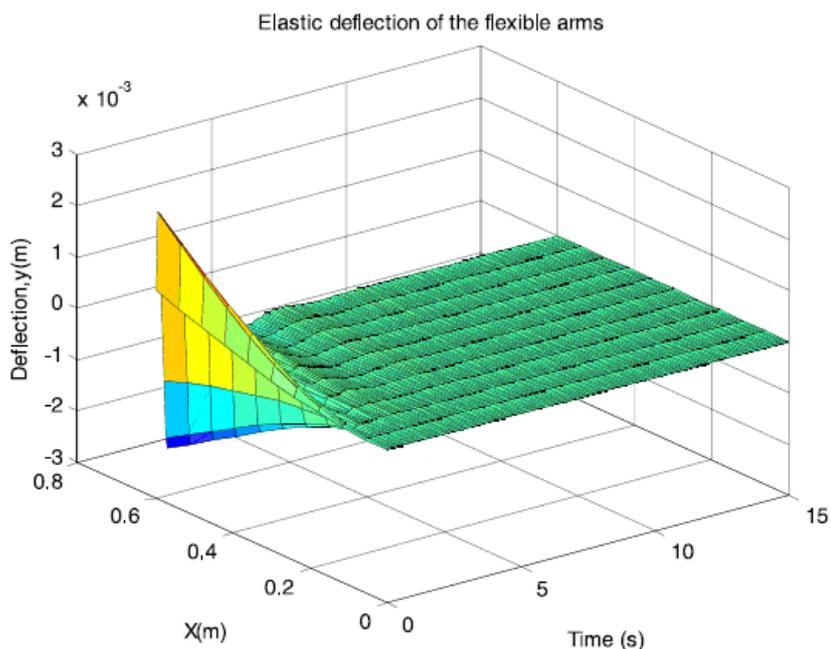


Рис. 3. Отклонение гибкого стержня (с контролем на основе обратной связи)

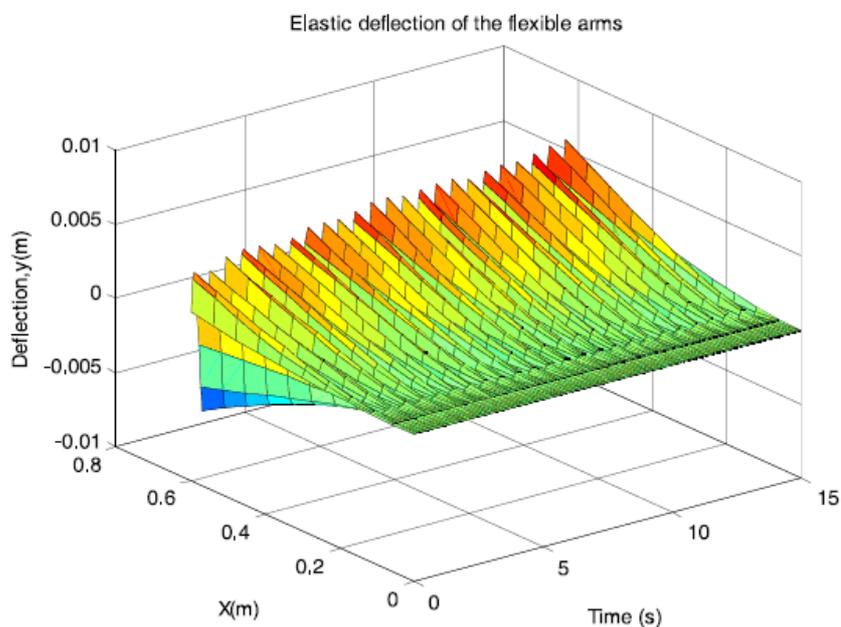


Рис. 4. Отклонение гибкого стержня (без контроля с обратной связью)

Таким образом, в настоящем исследовании управление системой гибкого перевернутого маятника описывается на основе модели «PDE-ODE», т.е. комплекса дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) и обыкновенных дифференциальных уравнений (ODE). Используя метод сингулярного возмущения, произведена декомпозиция свя-

занной модели на медленную и быструю подсистемы в разных масштабах времени. Используя принцип управления со скользящим режимом, для медленной подсистемы разработан надежный регулятор. Помимо этого, успешно был применен метод линейных матричных неравенств для проектирования в режиме поверхности скольжения («sliding mode

surface»). Также разработан регулятор с обратной связью для быстрой подсистемы. Результаты программного моделирования для системы гибкого перевернутого маятника продемонстрировали, что разработанная стратегия управления имеет надежные результаты в системе с помехами.

Заключение

В результате проведенного исследования получены:

1. Новая модель системы гибкого перевернутого маятника на основе дифференциальных уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений с определенными геометрическими ограничениями.

2. Уменьшение сложности этой модели за счет декомпозиции связанной динамики его системы на составные части – медленную и быструю подсистемы с помощью метода сингулярных возмущений.

3. Алгоритмы управления, соответствующие каждой из подсистем. При этом в качестве составляющей более сложного механизма управления медленной подсистемы разработан репрессор, использующий принцип управления со скользящим режимом. Для быстрой подсистемы подходящим явился простой алгоритм управления с обратной связью.

4. Методика граничного управления, позволяющая осуществить детекцию траектории конечного эффектора с перманентным подавлением вибрации.

Доказано, что проведенные математические операции привели к тому, что:

1. Разработанная модель является значительно более простой, чем существовавшие до этого традиционные модели.

2. Содержание в ней граничными условиями только граничной информации приводит к последующему упрощению проектирования систем управления гибким перевернутым маятником.

3. Разработанная методика граничного управления обладает высоким уровнем эффективности в системе с помехами, что подтверждено программным моделированием.

Обосновано, что:

1. Изучение системы кинематики и динамики гибкого перевернутого маятника является объективной предпосылкой к исследованию новых возможностей для управления им.

2. Возможность управления гибким обратным маятником на основе метода сингулярных возмущений имеет перспективное значение в индустрии проектирования механических систем.

Литература

- Butikov E.I. An improved criterion for Kapitza's pendulum stability // J. Phys. A: Math. Theor. 2011. Vol. 44. № 29. P. 1-17.
- Butikov E.I. Oscillations of a simple pendulum with extremely large amplitudes // Eur. J. Phys. 2012. Vol. 33. № 6. P. 1555-1563.
- Mikheev Y.V., Sobolev V.A., Fridman E.M. Asymptotic analysis of digital control systems // Autom. Remote Control. 1988. Vol. 49. № 9. P. 1175-1180.
- On the state feedback control of inverted pendulum with hysteretic nonlinearity / M.E. Semenov [et al.] // MATEC Web of Conferences [electronic resource]. 2014. № 16. URL: <https://www.researchgate.net/publication/287303629>. DOI: 10.1051/mateconf/20141605009 (date of application: 12.05.2020).
- Radiation of inverted pendulum with hysteretic nonlinearity / M.E. Semenov [et al.] // PIERS Proceedings. China, Guangzhou. 2014. P. 1442-1445.
- Стабилизация обратного гибкого маятника с гистерезисными свойствами / М.Е. Семенов и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 8. С. 516-525.
- Butikov E.I. Subharmonic resonances of the parametrically driven pendulum // J. Phys. A: Math. Theor. 2002. Vol. 35. № 30. P. 6209.
- Study on the force transmissibility of vibration isolators with geometric nonlinear damping / J.Y. Sun [et al.] // Nonlinear Dyn. 2013. Vol. 74. № 4. P. 1103-1111.
- Hysteretic nonlinearity and unbounded solutions in oscillating systems / A.M. Solovyov [et al.] // Procedia Engineering. 2017. Vol. 201. P. 578-583.
- Nonlinear Damping: From Viscous to Hysteretic Dampers / M.E. Semenov [et al.] // Recent Trends in Applied Nonlinear Mechanics and Physics (ed. Mohamed Belhaq), Springer Proceedings in Physics. 2018. Vol. 199. P. 259-275.
- Butikov E.I. An improved criterion for Kapitza's pendulum stability // J. Phys. A: Math. Theor. 2011. Vol. 44. № 29. P. 1-17.
- Mikheev Y.V., Sobolev V.A., Fridman E.M. Asymptotic analysis of digital control systems // Autom. Remote Control. 1988. Vol. 49. № 9. P. 1175-1180.
- Zhang Z.Y., Miao X.J. Global existence and uniform decay for wave equation with dissipative term and boundary damping // Comput. Math. Appl. 2010. Vol. 59. P. 1003-1018.
- Dadios E.P., Fernandez P.S., Williams D.J. Genetic algorithm on line controller for the flexible inverted pendulum problem // Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics. 2006. Vol. 10. № 2. P. 12-16.
- Luo Z-H., Guo B-Z. Shear force feedback control of a single-link flexible robot with a revolute joint // IEEE Transactions On Automatic Control. 1997. Vol. 42. № 1. P. 19-22.
- Осинцев М.С., Соболев В.А. Понижение разрывности задач оптимального оценивания для динамиче-

ских систем с сингулярными возмущениями // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2014. Т. 54. № 1. С. 50-64.

17. Стабилизация обратного маятника на двухколесном транспортном средстве / В.И. Рязских и др. // Вестник ЮУГУ (серия: математика, физика, механика). 2017. Т. 9. № 3. С. 27-33.

18. Wang L., Ross J. Synchronous neural networks of nonlinear threshold elements with hysteresis // *Neurobiology*. 1990. Vol. 87. С. 988-992.

19. Global existence and uniform stabilization of a generalized dissipative Klein–Gordon equation type with

boundary damping / Z.Y. Zhang [et al.] // *Math. Phys.* 2011. Vol. 52. № 2. P. 502-512.

20. Решмин С.А. Поиск главного бифуркационного значения максимального управляющего момента в задаче синтеза оптимального управления маятником // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2008. № 2. С. 5-20.

21. Анохин Н.В. Приведение многозвенного маятника в положение равновесия с помощью одного управляющего момента // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2012. № 5. С. 44-53.

Поступила 22.06.2020; принята к публикации 17.08.2020

Информация об авторах

Хати́ф Аббас Заини́б – аспирант кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Zainab.hatiff@gmail.com, тел. +7(905) 051-61-86

CONTROLLING A FLEXIBLE INVERTED PENDULUM BASED ON THE SINGULAR PERTURBATION METHOD

Z. Hatif Abbas

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents the data of the original studies relevant to the thematic area of design of mechanical systems using mathematical modeling. We studied the control process of flexible inverse pendulum based on the method of singular perturbations, the kinematics and dynamics of a flexible inverted pendulum. We developed a model of the system of a flexible inverted pendulum based on differential equations in partial derivative and ordinary differential equations with the defined geometrical constraints. To reduce the complexity of the model produced by the "splitting" of the associated dynamics of the system into its component parts – slow and fast subsystems using the method of singular perturbations. For each of the subsystems, we show a corresponding control algorithm. Repressor, using the principle of sliding mode control, was developed as part of a more complex mechanism of control of the slow subsystem. For the fast subsystem, we propose a simple algorithm of feedback control. Due to the performed transactions, unlike the traditional ones, the developed model is much simpler: the boundary conditions contain only boundary information, which simplifies the design of control systems. On the basis of such "composite" models, we propose a method of boundary control, which allows one to simultaneously track the trajectory of the end effector and to suppress vibration. We obtained simulation results that prove the effectiveness of techniques of boundary control. Also, the simulation demonstrated that the developed control strategy shows good results in system interference

Key words: flexible inverted pendulum, control, singular indignations, method, mechanical systems, mathematical model

References

1. Butikov E.I. "An improved criterion for Kapitza's pendulum stability", *J. Phys. A: Math. Theor.*, 2011, vol. 44, no. 29, pp. 1-17.
2. Butikov E.I. "Oscillations of a simple pendulum with extremely large amplitudes", *Eur. J. Phys.*, 2012, vol. 33, no. 6, pp. 1555-1563.
3. Mikheev Y.V., Sobolev V.A., Fridman E.M. "Asymptotic analysis of digital control systems", *Autom. Remote Control*, 1988, vol. 49, no. 9, pp. 1175-1180.
4. Semenov M.E. et al. "On the state feedback control of inverted pendulum with hysteretic nonlinearity", *MATEC Web of Conferences*, 2014, no. 16, available at: <https://www.researchgate.net/publication/287303629>, DOI: 10.1051/mateconf/20141605009 (date of access: 12.05.2020).
5. Semenov M.E. et al. "Radiation of inverted pendulum with hysteretic nonlinearity", *PIERS Proceedings*, China, Guangzhou, 2014, pp. 1442-1445.
6. Semenov M.E. et al. "Stabilization of the inverted flexible pendulum with hysteretic properties", *Mechatronics, Automation, Control (Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie)*, 2017, no. 8, pp. 516-525.
7. Butikov E.I. "Subharmonic resonances of the parametrically driven pendulum", *J. Phys. A: Math. Theor.*, 2002, vol. 35, no. 30, pp. 6209.
8. Sun JY. et al. "Study on the force transmissibility of vibration isolators with geometric nonlinear damping", *Nonlinear Dyn.*, 2013, vol. 74, no. 4, pp. 1103-1111.

9. Solovyov A.M. et al. "Hysteretic nonlinearity and unbounded solutions in oscillating systems", *Procedia Engineering*, 2017, vol. 201, pp. 578-583.
10. Semenov M.E. et al. "Nonlinear damping: from viscous to hysteretic dampers", *Recent Trends in Applied Nonlinear Mechanics and Physics* (ed. Mohamed Belhaq), Springer Proceedings in Physics, 2018, vol. 199, pp. 259-275.
11. Butikov E.I. "An improved criterion for Kapitza's pendulum stability", *J. Phys. A: Math. Theor.*, 2011, vol. 44, no. 29, pp. 1-17.
12. Mikheev Y.V., Sobolev V.A., Fridman E.M. "Asymptotic analysis of digital control systems", *Autom. Remote Control*, 1988, vol. 49, no. 9, pp. 1175-1180.
13. Zhang Z.Y., Miao X.J. "Global existence and uniform decay for wave equation with dissipative term and boundary damping", *Comput. Math. Appl.*, 2010, vol. 59, pp. 1003-1018.
14. Dadios E.P., Fernandez P.S., Williams D.J. "Genetic algorithm on line controller for the flexible inverted pendulum problem", *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2006, vol. 10, no. 2, pp. 12-16.
15. Luo Z-H., Guo B-Z. "Shear force feedback control of a single-link flexible robot with a revolute joint", *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1997, vol. 42, no. 1, pp. 19-22.
16. Osintsev M.S., Sobolev V.A. "Lowering the dimension of optimal estimation problems for dynamical systems with singular perturbations", *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics (Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki)*, 2014, vol. 54, no. 1, pp. 50-64.
17. Ryazhskikh V.I. et al. "Stabilization of the reverse pendulum on a two-wheeled vehicle", *Bulletin of SUSU (Series: Mathematics, Physics, Mechanics) (Vestnik YUUGU (seriya: matematika, fizika, mekhanika))*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 27-33.
18. Wang L., Ross J. "Synchronous neural networks of nonlinear threshold elements with hysteresis", *Neurobiology*, 1990, vol. 87, pp. 988-992.
19. Zhang Z.Y. et al. "Global existence and uniform stabilization of a generalized dissipative Klein-Gordon equation type with boundary damping", *Math. Phys.*, 2011, vol. 52, no. 2, pp. 502-512.
20. Reshmin S.A. "Search for the main bifurcation value of the maximum control moment in the problem of synthesis of optimal control of the pendulum", *News of Russian Academy of Sciences. Theory and Systems of Management (Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya)*, 2008, no. 2, pp. 5-20.
21. Anokhin N.V. "Bringing a multi-link pendulum into equilibrium-position with a single control moment", *News of Russian Academy of Sciences. Theory and Systems of Management (Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya)*, 2012, no. 5, pp. 44-53.

Submitted 22.06.2020; revised 17.08.2020

Information about the author

Hatif Abbas Zainib, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: Zainab.hatiff@gmail.com, tel. +7 (905) 051-61-86

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**И.А. Хайченко, В.В. Бабенко, Ю.В. Нефедов****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассматриваются вопросы расширения функциональных возможностей существующих устройств плавного пуска асинхронных электродвигателей с переменной нагрузкой, по индивидуальной компенсации реактивной мощности локальной системы электроснабжения и повышению ее энергетической эффективности. Существующие аппаратные средства решают эту задачу только на базе отдельных статических устройств. На основе анализа структуры устройств плавного пуска и принципов управления напряжением, подаваемым на асинхронный электродвигатель через полупроводниковые ключи (тиристоры), показаны целесообразность и возможность реализации на базе современных статических устройств пуска и типовых секций силовых конденсаторов многофункциональных статических устройств нового класса, обеспечивающих заданные параметры пусковых режимов асинхронного двигателя с одновременной компенсацией его реактивной мощности. В предлагаемом аппаратном решении осуществляется одновременная коммутация полупроводниковыми ключевыми элементами и асинхронного двигателя, и конденсаторной батареи для случая резко переменной (динамической) нагрузки. Обязательным условием такой коммутации конденсаторной батареи в сеть является реализация режима без броскового пускового тока. Определено, что реализация предложенного аппаратного решения может дать существенный экономический эффект по снижению стоимости оборудования при сохранении всех технических и энергетических параметров автоматизированных асинхронных электроприводов насосов, вентиляторов, компрессоров, тягового и тому подобного оборудования. Определена эффективность применения данного аппаратного решения по снижению удельной стоимости оборудования в пределах от 800 руб. до 2700 руб. на 1 кВт мощности асинхронного электропривода

Ключевые слова: асинхронный электропривод с переменной нагрузкой, режимы пуска, индивидуальная компенсация реактивной мощности, тиристорные контакторы, система управления

Введение

В соответствии с Федеральным законом 261-ФЗ от 23.11.2009 г. «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», в производственной сфере предусмотрено общее снижение энергоемкости до 20%. Естественно, что одним из ключевых направлений реализации этой задачи является использование высокотехнологичных решений в области автоматизированного асинхронного электропривода, потребляющего сейчас 55-60% вырабатываемой в РФ электрической энергии. В данной статье рассмотрен конкретный сегмент таких асинхронных электроприводов (ЭП), которые работают с резко переменным графиком нагрузки (частые включения и отключения), что по ГОСТ Р 52776-2007 (МЭК 60034-1-2004) соответствует типовому режиму S4.

Так, широкое распространение в энергоемких производствах получили компрессоры на основе асинхронного ЭП, предназначенные для выработки воздуха высокого давления в течение трехсменной работы (рис. 1).

При таком режиме работы возникает необходимость периодического пополнения ресивера воздухом, по мере его расходования на производственные нужды, что сопровождается частыми включениями асинхронного двигателя (АД) компрессора (для данного производства за три смены число включений/отключений превышает полторы сотни).

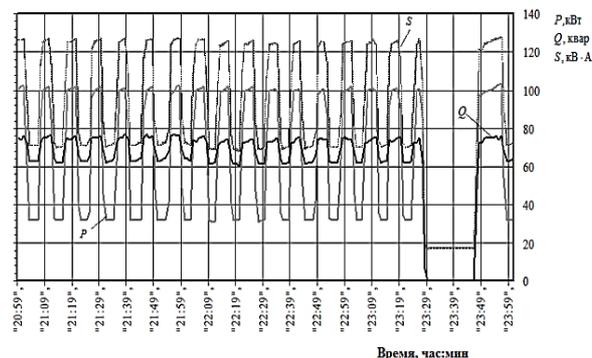


Рис. 1. Типовой график нагрузки компрессора

В аналогичном режиме постоянной подкачки с частыми коммутациями АД работают и насосные станции объектов с большим потреблением воды (рис. 2).

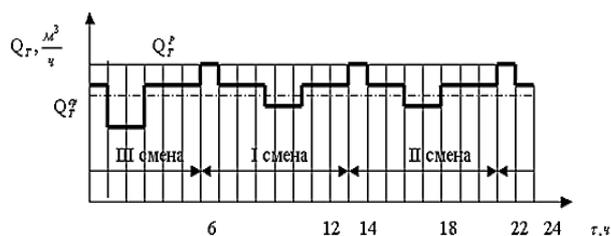


Рис. 2. Типовой график нагрузки насосной станции

В течение рабочего дня насосная станция согласно графику (рис. 2) неоднократно осуществляет пусковые режимы. Количество таких пусков в среднем по году можно оценить в 100 за день, причем частота коммутаций выше в часы пикового расхода воды: с 5 до 6, с 13 до 14, с 21 до 22. Как и в предыдущем примере, тяжелые (прямые) пуски и работа в установившемся режиме АД сопровождается потреблением реактивной мощности разной величины.

Аналогичный режим работы («повторно-кратковременный» с частыми пусками) характерен для автоматизированных систем приточно-вытяжной вентиляции с повышенными требованиями к уровню кондиционирования, тяговых приводов конвейеров, лентопротяжных и им подобных механизмов.

Для таких случаев, в соответствии с технологическими требованиями данных производств, необходимо регулирование параметров (обычно скорости) асинхронных электроприводов, поддержание высоких показателей по электрическому КПД и коэффициенту мощности ($\cos\varphi$). Даже в режимах работы АД, близких к номинальному, при электрическом КПД 80-92% и $\cos\varphi = 0,8-0,9$ общий энергетический КПД составляет 64-83% и имеет тенденцию снижения до 52-70%, если не реализовать специальные энергосберегающие технологии, связанные с регулированием напряжения и реактивной мощности на базе современных статических устройств.

Постановка задачи

В направлении аппаратных решений по регулированию напряжения (соответственно и скорости) асинхронного электропривода с переменной нагрузкой сейчас наиболее востребованы преобразователи частоты, которые способны обеспечить требуемое качество регулирования скорости и уровень минимального энергопотребления как в пусковых, так и в установившихся режимах. Однако стоимость таких устройств достаточно велика. В тех случаях, когда режим работы повторно-кратковременный и

не требует регулирования параметров асинхронного двигателя после его пуска, то очень часто применяются более дешевые, чем преобразователи частоты, статические устройства плавного пуска (УПП).

Эти устройства применяются для реализации управляемого включения АД без токовых перегрузок и корреляции формируемого пускового момента в соответствии с моментом нагрузки. Для этого питание обмоток АД осуществляется через полупроводниковые ключевые элементы (тиристоры, семисторы). Специальный алгоритм включения тиристоров по фазам дает возможность значительного снижения коммутационных токов, облегчает тепловой режим АД, повышает работоспособность ЭП и исполнительного механизма.

В зависимости от технологических требований к качеству регулирования процессов пуска и торможения асинхронного электропривода, силовая часть УПП реализуется с одной, двумя или тремя группами полупроводниковых ключей (обозначаются терминами - одно-, двух-, трехфазные устройства). Наибольшее распространение получили двухфазные УПП. Они применяются в приводах мощностью до 250 кВт для снижения динамических нагрузок при пуске в оборудовании со среднетяжелыми условиями пуска при отсутствии жестких требований к ограничению тока (рис. 3).

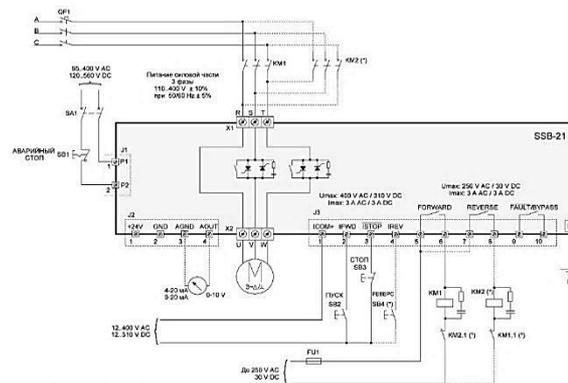


Рис. 3. Схема подключения двухфазного УПП

Как было отмечено выше, в основе работы УПП лежит принцип управления напряжением, подаваемым на АД через полупроводниковые ключи (как правило, тиристоры). Такое управление обычно реализуется двумя режимами. Импульсный режим управления позволяет управлять соотношением интервалов включенного и выключенного состояния АД. Особенностью режима является отсутствие генерации высших гармонических напряжений. Это связано с тем, что переключение тиристорных

ключей всегда происходит при протекающем нулевом токе через тиристор. Во втором режиме используются принципы фазоимпульсного управления АД, при котором осуществляется симметричное изменение угла открытия тиристорov в течении каждого полупериода питающего напряжения [1]. В таком режиме регулирования величина действующего напряжения на входе АД определяется длительностью включенного состояния тиристорov. Это увеличивает точность регулирования по сравнению с первым режимом, однако в питающую сеть генерируются высшие гармонические напряжения, которые отрицательно влияют не только на аппаратуру управления и статические конденсаторы, но и ускоряют процессы старения изоляции силового электрооборудования (асинхронные двигатели, трансформаторы) и вызывают рост дополнительных потерь электроэнергии в них и возможность возникновения резонансных процессов.

Дополнительно хотелось бы отметить, что аналогичные аппаратные и алгоритмические решения реализуются и в тиристорных регуляторах мощности, которые широко применяются для разнообразных термических электронагревательных установок, следовательно, предложенные далее решения могут быть использованы и для более широкого круга объектов [2].

Как было отмечено выше, одним из основных направлений повышения энергоэффективности автоматизированного асинхронного электропривода является компенсация реактивной мощности, которая позволяет одновременно повысить качество электроэнергии в системах электроснабжения предприятий. Это положение закреплено на законодательном уровне целым рядом стандартов, регламентирующих качество электроэнергии, требования по компенсации реактивной мощности (КРМ), и используемых в этих целях средств (ГОСТ 32144-2013, ГОСТ 61921-2013, ГОСТ Р 56744-2015).

Аппаратные средства компенсации реактивной мощности (КРМ), в зависимости от технологических требований, параметров электро-технического оборудования и сложности управления, могут быть следующих типов [3]:

- нерегулируемые – путем подключения конденсаторной батареи фиксированной емкости ручным, полуавтоматическим способом или прямым подсоединением к нагрузке;
- автоматические – путем включения различного количества ступеней конденсаторных батарей (КБ) для варьирования величины реактивной мощности;

- динамические – для компенсации быстро изменяющихся нагрузок.

С точки зрения вопросов энергосбережения в сетях электроснабжения, наиболее эффективен индивидуальный способ КРМ, который реализуется при установке КБ непосредственно на шины источника РМ индуктивного характера (АД). В рассматриваемом в данной статье сегменте автоматизированного электропривода с переменной нагрузкой применима именно индивидуальная КРМ, выполняющая следующие функции:

1. разгрузка питающих сетей электроснабжения от реактивных токов;
2. возможность использования проводов с меньшей пропускной способностью;
3. повышение качества электроснабжения;
4. оптимизация режимов работы ЭП.

Технико-экономическая эффективность устройств КРМ в значительной степени зависит от средств подключения КБ к системе электроснабжения. В настоящее время реализуются два основных типа низковольтных технических средств: электромагнитные контакторы (рис. 4) и полупроводниковые ключевые элементы (тиристоры, семисторы).

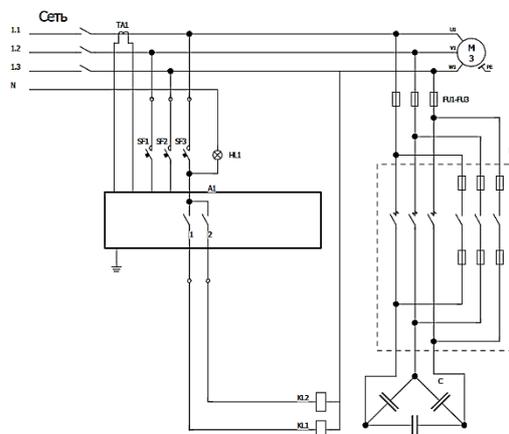


Рис. 4. Типовая схема автоматического подключения КБ электромагнитными контакторами

Коммутация полупроводниковыми ключевыми элементами применяется в случаях с резко переменной (динамической) нагрузкой (рис. 5).

Такое подключение КБ выгодно отличается от контакторного по быстрдействию, работе на отказ КБ и коммутационной аппаратуры, а также по электромагнитной совместимости силового оборудования. В связи с этими причинами, компенсация реактивной мощности асинхронного электропривода с переменной нагрузкой эффективна при коммутации силовыми полупроводниковыми ключами [4,5].

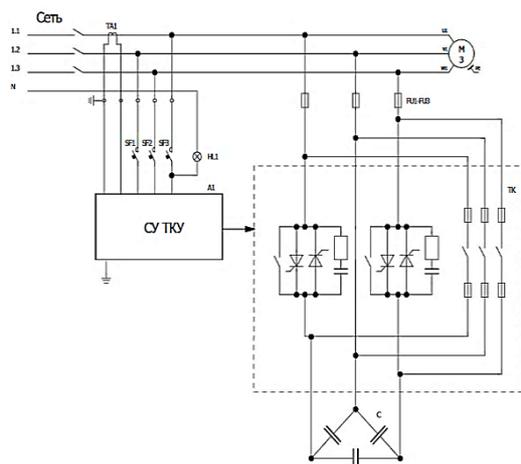


Рис. 5. Типовая схема подключения КБ полупроводниковыми ключевыми элементами

Единственным недостатком этого способа коммутации является большая стоимость тиристорных коммутаторов по сравнению с электромагнитными контакторами.

Решение сформулированной задачи

Рассмотренные выше проблемы автоматизированных электроприводов потребителей с переменной нагрузкой и индивидуальной компенсацией РМ с помощью тиристорных конденсаторных установок (ТКУ) могут быть решены на базе предлагаемого аппаратного решения. В его основе лежит идея расширения функциональных возможностей УПП в направлении компенсации реактивной мощности. При этом, по сути два таких специализированных статических устройства, как УПП и ТКУ, могут быть реализованы на единой силовой платформе типовых УПП с незначительной модернизацией в части конструкторской компоновки основного силового оборудования и системы управления (СУ). На рис. 6 представлена принципиальная трехфазная электрическая схема подключения такой унифицированной пуско-компенсирующей установки (УПКУ).

Если сравнить структуру и коммутацию силовых элементов типового УПП и УПКУ, то очевидно, что существуют минимальные различия в части подключения секции КБ к вводным клеммам U, V, W асинхронного двигателя. Типовая секция КБ, как правило, включает в себя собственно конденсатор выбранной емкости, разрядные резисторы, предохранители, разъединители и даже фильтрующие дроссели.

Как правило, все это оборудование заводского изготовления комплектуется в отдельном шкафу и не требует каких-либо корректировок.

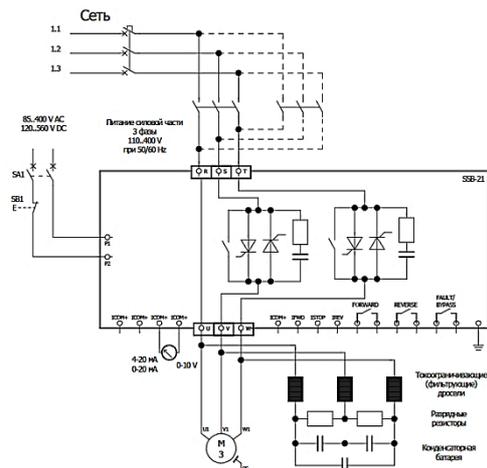


Рис. 6. Схема подключения УПКУ

Что касается СУ предлагаемой УПКУ, то она может быть также реализована на базе современных микроконтроллеров, используемых в уже выпускаемых УПП таких известных компаний, как Semikon, SIEMENS, Schneider Electric, APC, ABB, EATON и др.

Так, например, в УПП SKSS1 компании Semikon используется микропроцессорный 8 битный контроллер фирмы Zilog семейства Z86, а также все элементы, необходимые для выполнения трехфазного пуска асинхронного двигателя, включая силовые тиристоры или тиристорные модули SEMIKRON (или тиристорные сборки SEMISTACK), RC снабберы и токовый трансформатор. SKSS1 позволяет не только реализовать режим плавного пуска и multifunctional защиту трехфазных асинхронных двигателей, но и использовать его в составе системы комплексной автоматизации, а также организации дистанционного управления и контроля состояния объекта управления с пульта управления оператора. Однако в случае его использования в качестве основы УПКУ необходимо предусмотреть новую прошивку контроллера, реализующую необходимый алгоритм управления не только процессами пуска – торможения, но одновременного бестокового подключения БК. При этом главным условием надежной и долговечной работы подключаемой конденсаторной батареи будет обеспечение импульсного режима управления тиристорными группами. Причем, одновременное подключение параллельно соединенных АД и КБ во время пуска и во время установившегося режима работы должно происходить только в моменты, когда напряжение сети имеет уровень, близкий к нулевому в каждом полупериоде [6].

Очевидно, что при сохранении основных функциональных возможностей УПП и ТКУ,

предлагаемая УПКУ значительно проще технически и алгоритмически стыкуется с имеющимися системами автоматизации технологических процессов, а по цене может быть значительно дешевле, чем вариант применения двух отдельных устройств для плавного пуска АД и индивидуальной компенсации его реактивной мощности. Для определения экономической эффективности предлагаемого решения была проведена экспертная оценка средней стоимости низковольтных УПП и ТКУ ведущих производителей для АД мощностью от 10 до 100 кВт.

Ниже, для АД мощностью $P = 45$ кВт, приведена усредненная стоимость УПП и ТКУ мощностью $Q = 30$ кВАр (предполагается компенсация РМ до уровня коэффициента мощности $\cos\phi = 0,99$).

Так, усредненная стоимость всей установки для плавного пуска (в соответствии с каталогами для известных моделей: Schneider Electric ATS 22D88Q, Siemens 3RW4427-1BC34, Aucom CSXi-045-V4-C1(C2), Danfoss MCD 201-045-T4, ЭнерджиСейвер ES45L, IDS Drive YHR5-45KW, ABB/PSR105 45/380) колеблется от 85000 руб. до 170000 руб.

Усредненная стоимость ТКУ для КРМ (в соответствии с каталогами для известных моделей: фирма CIRCUTOR, установки со статическим контактором OPTIM EMS-C-31,25-440; Новосибирский завод конденсаторов, АКУТ-НЗК 0,4-30-10-УЗ; компания «Хомов электро», установки КРМТФ-0,4-0,69 кВ с тиристорной системой коммутации; фирма «Нюкон», установки АУКРМТ-0,4 кВ с регулятором РМ NUCON RPCF-12 и тиристорным контактором TN или TSM-HV50 производства Epcos AG) колеблется от 55000 руб. до 150000 руб.

Усредненную стоимость УПКУ для АД мощностью $P = 45$ кВт и $Q = 30$ кВАр, экспертно, можно определить в диапазоне от 105000 руб. до 160000 руб.

Очевидно, что снижение затрат только по стоимости основного оборудования (еще присутствует снижение и эксплуатационных расходов и зарплата обслуживающего персонала) может составить от 35000 руб. до 120000 руб. для АД мощностью 45 кВт.

А снижение удельной стоимости затрат на 1 кВт мощности может составить от 800 руб. до 2700 руб., что является очень хорошим показателем для низковольтных статических преобразователей общепромышленного применения.

Выводы

1. В промышленном секторе существует большой класс потребителей с переменной нагрузкой (насосы, вентиляторы, компрессоры, тяговые двигатели и тому подобное оборудование), использующий асинхронный автоматизированный электропривод. Для повышения энергоэффективности асинхронного электропривода целесообразна реализация мероприятий по индивидуальной компенсации реактивной мощности. Существующие аппаратные средства решают эту задачу только на базе отдельных статических устройств.

2. Анализ структуры и технических характеристик современных тиристорных устройств плавного пуска для асинхронных электродвигателей позволяет использовать их как основу нового класса многофункциональных статических устройств.

3. Предложено аппаратное решение по реализации, на основе выпускаемых устройств плавного пуска и секций силовых конденсаторов, статического устройства, обеспечивающего заданные параметры пусковых режимов асинхронного двигателя с одновременной компенсацией реактивной мощности и более удобную его адаптацию с имеющимися системами автоматизации технологических процессов.

4. Техничко-экономический эффект от применения данного аппаратного решения по снижению удельной стоимости оборудования экспертно может быть оценен в пределах от 800 руб. до 2700 руб. на 1 кВт мощности асинхронного электропривода.

Литература

1. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода/ Л.П. Петров, О.А. Андрющенко, В.И. Капинос и др. М.: Энергоатомиздат, 1986. 199 с.
2. Крысанов В.Н., Нефедов Ю.В., Романов А.В. Контроль параметров электромагнитной совместимости модернизированного оборудования автоклавного производства // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т.15. № 2. С.77-81.
3. Крысанов В.Н. Аппаратно-программное управление режимами узлов нагрузки региональных сетей электроснабжения с помощью статических устройств. Воронеж: ВГТРК, 2017. 244 с.
4. Крысанов В.Н., Зайцев А.И. Энергосберегающие технологии в распределенных электроэнергетических сетях. Воронеж: ВГТРК, 2016. 223 с.
5. Крысанов В.Н. Эффективность использования тиристорных конденсаторных установок в промышленных системах электроснабжения // Энергетическая безопасность и энергосбережение. 2017. № 3. С. 15-20.
6. Крысанов В.Н., Демихов А.В. Оптимизация методов подключения конденсаторной батареи // Электрические комплексы и системы управления. 2009. №4 (16). С.53-58.

Информация об авторах

Хайченко Илья Александрович – аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: li740@yandex.ru, тел. 89525557503

Бабенко Владимир Владимирович – аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vova.babenko.94@mail.ru, тел. 89155408873

Нефедов Юрий Васильевич – аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nefedowjuriy@yandex.ru, тел. 8906-673-44-40

**EXPANSION OF FUNCTIONAL CAPABILITIES OF STATIC CONVERTERS
FOR ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES**

I.A. Khaychenko, V.V. Babenko, Yu.V. Nefedov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers issues of expansion of functional capabilities of existing devices of smooth start-up of asynchronous motors with variable load, individual compensation of reactive power of the local power supply system and increase of its energy efficiency. Existing hardware solves this task only on the basis of separate static devices. Based on the analysis of the structure of the smooth start devices and the principles of voltage control supplied to the asynchronous electric motor through semiconductor switches (thyristors), the expediency and possibility of implementing, on the basis of modern static start-up devices and typical sections of power capacitors, multifunctional static devices of a new class providing the specified parameters of start-up modes of the asynchronous motor with simultaneous compensation of its reactive power is shown. Proposed hardware solution provides simultaneous switching of semiconductor key elements of both asynchronous motor and capacitor bank for case of sharply variable (dynamic) load. A prerequisite for such switching of the capacitor battery into the network is the implementation of a mode without a throw-off start-up current. It is determined that the implementation of the proposed hardware solution can have a significant economic effect on reducing the cost of equipment while maintaining all technical and energy parameters of automated asynchronous electric drives of pumps, fans, compressors, traction and the like equipment. The efficiency of application of this hardware solution is determined, on reduction of specific cost of equipment within the range from 800 rubles to 2700 rubles per 1 kW of capacity of asynchronous electric drive

Key words: asynchronous electric drive with variable load, startup modes, individual compensation of reactive power, thyristor contactors, control system

References

1. Petrov L.P., Andryushchenko O.A., Kapinos V.I. “Thyristor voltage converters for asynchronous electric drive” (“Tiristornye preobrazovateli napryazheniya dlya asinkhronnogo elektroprivoda”), Moscow, Energoatomizdat, 1986, 199 p.
2. Krysanov V.N., Nefedov Yu.V., Romanov A.V. “Control of electromagnetic compatibility parameters of the upgraded equipment of the autoclave plant”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 2-1, pp. 77-81.
3. Krysanov V.N. “Hardware and software control of load modes of regional power supply networks using static devices” (“Apparatno-programmnoe upravlenie rezhimami uzlov nagruzki regional'nykh setey elektrosnabzheniya s pomoshch'yu staticheskikh ustroystv”), Voronezh, VGTRK, 2017, 244 p.
4. Krysanov V.N., Zaytsev A.I. “Energy-saving technologies in distributed electric power networks” (“Energoberegayushchie tekhnologii v raspredelennykh elektroenergeticheskikh setyakh”), Voronezh, VGTRK, 2016, 223 p.
5. Krysanov V.N. “Efficiency of use of thyristor condenser plants in industrial power supply systems”, *Energy Security and energy Saving (Energeticheskaya bezopasnost' i energoberezhenie)*, 2017, no. 3, pp. 15-20.
6. Krysanov V.N., Demihov A.V. “Optimization of methods of connection of capacitor battery”, *Electrical Complexes and Control Systems (Elektricheskie komplekсы i sistemy upravleniya)*, 2009, no. 4(16), pp. 53-58.

Submitted 26.05.2020; revised 17.08.2020

Information about the authors

Илья А. Хайченко, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394016, Russia), e-mail: li740@yandex.ru, tel.: +7952-555-75-03

Vladimir V. Babenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394016, Russia), e-mail: vova.babenko.94@mail.ru, tel.: +7915-540-88-73

Yuriy V. Nefedov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394016, Russia), e-mail: nefedowjuriy@yandex.ru, tel.: +7906-673-44-40

СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ В АКТИВНЫХ СРЕДСТВАХ АДАПТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СБОРКЕ

С.В. Кузнецова, А.Л. Симаков

Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров, Россия

Аннотация: важным аспектом проблемы автоматизации сборочных операций является адаптация деталей. Средства адаптации (приспособления, коррекции) положения деталей – это инженерные приемы, направленные на уменьшение рассогласования между совмещаемыми поверхностями сборочных компонент с целью сопряжения. Развитие средств адаптации возможно за счёт поиска новых конструктивных решений, совершенствования элементной базы существующих и синтеза алгоритмов управления движением соединяемых деталей. Рассматривается последнее направление, а именно, подход к синтезу управления движением детали в активных средствах адаптации при сборке. Цель – отыскать алгоритм, обеспечивающий точность и плавность движения детали, необходимые для предотвращения процессов заклинивания, соударения, отскока. Управляющее воздействие синтезировано методом модального управления. Метод опирается на построение математической модели объекта – процесса адаптации детали в переменных состояниях. Переменными состояниями процесса являются координата адаптации и скорость движения детали. Определены структуры наблюдателей, т.е. специальных вычислительных алгоритмов, используемых при отсутствии возможности измерений (полных или неполных) переменных состояний процесса. Путем имитационного моделирования исследовано влияние отклонений параметров объекта и оценок переменных состояний на качество процесса адаптации

Ключевые слова: автоматизированная сборка, движение детали по координате адаптации, математическая модель, модальное управление, наблюдатель, синтез управления

Введение

Проблема автоматизации сборочных операций имеет множество воззрений, центральным вопросом является автоматическая адаптация, т.е. пространственное ориентирование сопрягаемых поверхностей присоединяемых деталей для обеспечения их совмещения. В настоящее время адаптация может быть реализована на базе средств активной и пассивной адаптации деталей при сборке.

Средства активной адаптации основаны на использовании принципа обратной связи, которая определяет направление смещения контуров собираемых деталей и с помощью исполнительных механизмов обеспечивает уменьшение рассогласования этих контуров до тех пор, пока они не совпадут. К средствам активной адаптации относят промышленных сборочных роботов, оборудованных средствами осязания (системой технического зрения [1], силомоментными датчиками и т.п. [2], [3]).

Пассивная адаптация осуществляется при помощи специальных конструктивных решений: ориентирующих приспособлений, сборочного инструмента. Устройства не оснащаются измерительными сенсорами и энергию движения получают от внешнего агрегата (пресса, привода или манипулятора). Пассив-

ными адаптирующими средствами являются модули упругого базирования [4], устройства с удаленным центром податливости [5], устройства синхронного позиционирования [6] и др.

Низкий уровень автоматизации сборочных операций требует развития средств адаптации. Задачу можно решить следующими путями: создание новых конструкций ориентирующих сборочных приспособлений (технологический подход), модернизация сборочного оборудования с целью повышения точностных характеристик (геометрический подход) и разработка управляющих воздействий движением деталей при сборке (подход управления). С точки зрения управления, алгоритмы, реализуемые в средствах адаптации, нацелены на формирование последовательности сборочных движений; траектории совмещения деталей; качественных показателей процесса движения. Вопросам синтеза управления качеством процесса в активных средствах адаптации посвящается данный материал.

Постановка задачи: требуется синтезировать алгоритм управления движением детали в активных средствах адаптации при автоматизированной сборке, обеспечивающий высокую точность и плавность движения детали по координате адаптации, необходимые для предотвращения процессов заклинивания, соударения, отскока.

Проверку работоспособности синтезированного управления, при наличии отклонений в оценке параметров процесса адаптации, осуществить методом имитационного моделирования.

К синтезируемому управлению процессом адаптации предъявляются высокие требования по точности (ограничения, накладываемые условиями собираемости), быстродействию (длительности), качеству регулирования (отсутствие рывков и колебаний, приводящих к нежелательным контактным взаимодействиям деталей или заклиниванию при сборке), робастности (малое изменение выхода при незначительных вариациях параметров объекта), устойчивости к помехам (нецелесообразность введения форсирующих звеньев в структуру системы), особенности технической реализации (доступность, простота).

Управление по отклонению или по состоянию процесса адаптации?

Управление возможно осуществить как по отклонению (управление выходом), так и по состоянию (модальное управление) объекта или процесса. Оба варианта предусматривают замыкание обратных связей. В первом случае обратная связь по выходу, во втором – по состоянию.

Состоянием является минимальная информация о процессе адаптации, позволяющая определить ход его протекания в последующий момент времени при известных управляющих воздействиях. Результат измерения сенсорами (положения и ориентации) параметров движения детали – это есть выходные переменные (выход).

Специфика процесса адаптации заключается в том, что моменту завершения ориентации детали желательно, чтобы рассогласование и его производные (а значит скорости, ускорения детали, т.е. параметры состояния) были близки к нулю. Отсюда вытекает целесообразность контроля параметров состояния.

Реализация управления выходом предполагает использование измерителя одного физического параметра (либо координаты, либо скорости), восстанавливая по его показаниям вторую неизмеряемую переменную. Дифференцирование показаний датчика положения, интегрирование текущей скорости сопряжено с "зашумлением" канала управления, усилением помех измерения. Необходимость оснащения корректирующими средствами приводит к увеличению инерционности канала управле-

ния, его усложнению. Предпринимаются попытки построения интеллектуального управления качеством процесса адаптации (нечеткое регулирование) [7].

Управление по состоянию (модальное управление) [8] способно устранить перечисленные недостатки. Методу свойственна простота технической реализации. Введение корректирующих устройств (форсирующих, дифференцирующих) не требуется. Безынерционный характер обратных связей по координатам состояния, экономичность технической реализации и относительная простота являются достоинствами метода.

На практике измерение значений всех переменных состояния (т.е. замыкание обратных связей по каждой) проблематично. Потребность в извлечении неизмеримых переменных процесса удовлетворяет наблюдатель. Наблюдатель состояния – это модель (вычислительный алгоритм), позволяющая определить значения переменных состояния по выходу. Экономически целесообразнее реализовать наблюдатель программно на встраиваемом в состав системы управления контроллере, нежели аппаратно извлекать недостающую информацию о состоянии объекта с помощью множества датчиков.

Вышеизложенное является основанием к выбору управления по состоянию.

Модель процесса адаптации детали

Управление по состоянию предполагает разработку математической модели процесса [9]. Моделью процесса адаптации детали по одной координате q может служить движение механической колебательной системы (рис. 1).

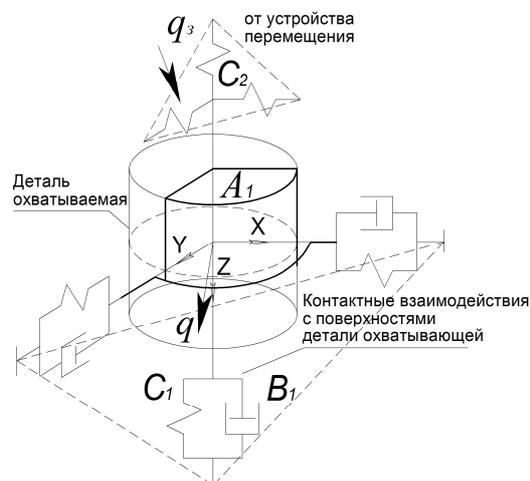


Рис. 1. Динамическая модель процесса адаптации детали при сборке

Поведение координаты адаптации q детали при сборке описывается уравнением:

$$A_1 \ddot{q} + B_1 \dot{q} + C_1 q = C_2 (q_\varepsilon - q), \quad (1)$$

где A_1 – параметр, характеризующий инерционные свойства перемещаемой детали; B_1 – коэффициент, соответствующий диссипативным свойствам среды; C_1 – коэффициент, описывающий упругие свойства контактного взаимодействия охватываемой (перемещаемой) и охватывающей (неподвижной) соединяемых деталей; q_s – задающее перемещение охватываемой детали; C_2 – коэффициент упругих свойств модуля, передающего движение от исполнительных устройств к детали.

Исходя из (1) определено векторно-матричное описание процесса движения детали по координате q :

$$\begin{cases} \dot{X} = \dot{A}X + BU, \\ Y = CX + DU, \end{cases}$$

где $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ – вектор состояния

($x_1 = q$; $x_2 = \dot{q}$ – переменные состояния процесса адаптации, а именно перемещение и

скорость детали); $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(C_1 + C_2) & -B_1 \\ A_1 & A_1 \end{bmatrix}$ – мат-

рица свойств процесса; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \\ A_1 \end{bmatrix}$ – матрица

управления; $C = [1 \ 0]$ – матрица выхода;

$D = [0]$ – матрица прямой связи; $U = q_\varepsilon$ – управляющее воздействие; Y – вектор выхода.

Движение при адаптации – это управляемый процесс, характеризующийся уменьшением рассогласования между собираемыми деталями [10]. Успех сборочной операции обеспечивается качеством управления этим сложным динамическим процессом. Алгоритм управления процессом – это есть желаемый результат процедуры синтеза. Отправной точкой для синтеза параметров алгоритма управления служит желаемый процесс совмещения деталей при сборке. Он характеризуется начальным рассогласованием деталей при сборке – $q(t_0)$; допустимым рассогласованием между деталями – $q_\varepsilon - q \leq \varepsilon$; требуемым временем

на адаптацию – t_p ; остановкой по окончании – $\dot{q}(t_p) \rightarrow 0$ [11]. Характер динамического процесса – монотонный. Присутствие рывков и колебаний способно привести к нежелательным контактным взаимодействиям деталей или заклиниванию.

Синтез управления по состоянию процесса адаптации

Воспользуемся методом синтеза управления процессом адаптации по состоянию. Метод позволяет в синтезируемой системе распределить корни характеристического уравнения (иными словами требуемые моды) – p_i желаемым образом. Мода представляет собой часть свободной составляющей решения дифференциального уравнения, выражающаяся через экспоненту, корень характеристического полинома и время. Метод базируется на формировании обратных связей по координатам состояния процесса [8]. Расчет коэффициентов передачи каналов отрицательных обратных связей по координатам состояния α_i осуществляют путем решения системы алгебраических уравнений, составленной приравнованием коэффициентов характеристического полинома синтезируемой замкнутой по координатам состояния системы –

$$D(p) = p^2 + \left(\frac{B_1}{A_1} + \frac{C_2}{A_1} \alpha_2 \right) p + \left(\frac{(C_1 + C_2)}{A_1} + \frac{C_2}{A_1} \alpha_1 \right)$$

и желаемого характеристического полинома – $N(p) = p^2 + S_1 \Omega p + \Omega^2$ (настройка процесса на стандартную линейную форму, например, Бесселя).

Коэффициенты обратных связей по координатам состояния определяются:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \left(\Omega^2 - \frac{(C_1 + C_2)}{A_1} \right) \cdot \frac{A_1}{C_2}, \\ \alpha_2 = \left(S_1 \Omega - \frac{B_1}{A_1} \right) \cdot \frac{A_1}{C_2}. \end{cases} \quad (2)$$

В соотношениях (2) введены следующие обозначения параметров: $\Omega = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n p_i}$ – средне-геометрический корень характеристического уравнения синтезируемой системы, косвенно определяющий длительность процесса адаптации ($t_p \approx \frac{(1...3)\pi}{\Omega}$); S_i – коэффициент формы, определяющий прямые показатели качества

переходного процесса (перерегулирование, число колебаний, декремент затухания и т.д.).

Структурная схема полученной путем синтеза системы модального управления процессом адаптации изображена на рис. 2.

Поскольку модель процесса адаптации может быть охарактеризована как статическая система, то при классическом модальном управлении установившиеся значения координат

состояния могут оказаться неудовлетворительными:

$$\begin{bmatrix} x_1(t_p) \\ x_2(t_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_2}{C_1 + C_2(1 + \alpha_1)} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Этот прием гарантирует лишь желаемую форму и показатели качества переходных процессов, однако при этом не достигается требуемой статической точности [12].

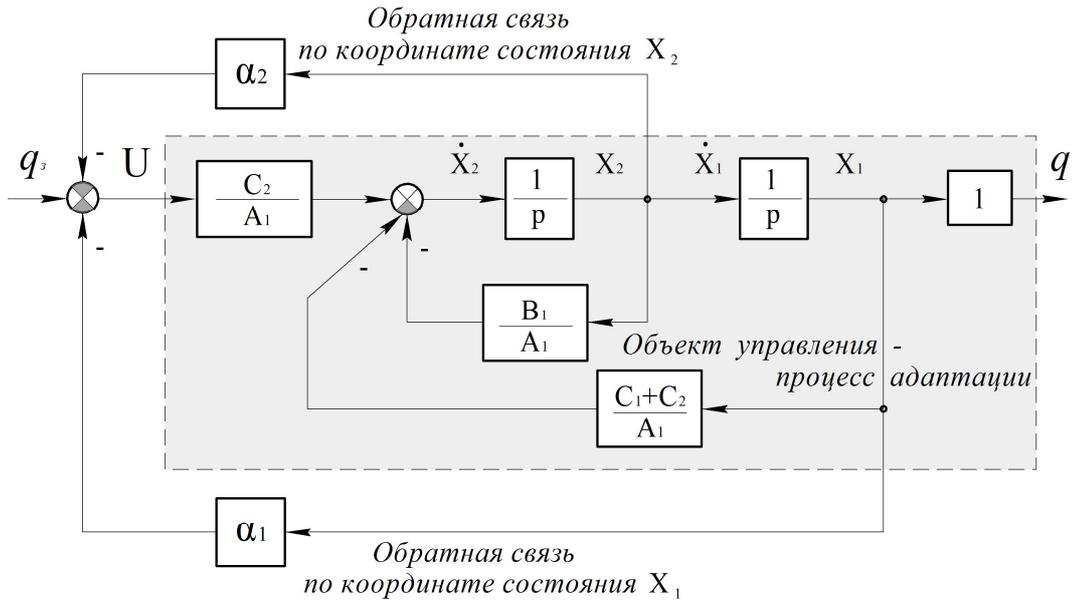


Рис. 2. Структурная схема системы управления по состоянию процесса адаптации при полных измерениях

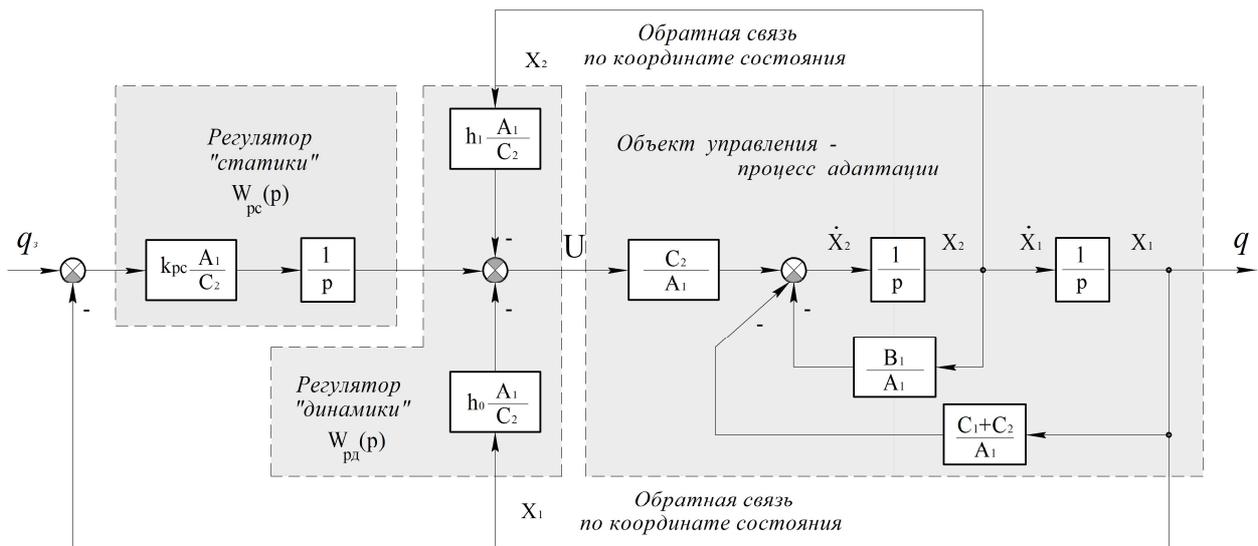


Рис. 3. Структурная схема системы астатического модального управления по состоянию процесса адаптации при полных измерениях

Если условие $q_\varepsilon - \frac{C_2}{C_1 + C_2(1 + \alpha_1)} \leq \varepsilon$ не выполняется, то целесообразно преобразовать систему, обеспечивая астатизм.

Структура системы модифицированного управления состоянием процесса адаптации представлена на рис. 3.

Суть преобразования модального метода заключается в следующем: в структуру системы вводится регулятор “статики”, обеспечивающий астатизм, и регулятор “динамики”, формирующий обратные связи по координатам состояния процесса [8]. Настройка динамического процесса осуществляется на стандартную линейную форму на порядок выше $(n+1)$, которой соответствует желаемый характеристический полином вида: $N(p) = p^3 + S_2\Omega p^2 + S_1\Omega^2 p + \Omega^3$. Синтезируемая модифицированная система, замкнутая по координатам состояния, описывается характеристическим полиномом:

$$D(p) = p^3 + \left(\frac{B_1}{A_1} + h_1\right)p^2 + \left(\frac{(C_1 + C_2)}{A_1} + h_0\right)p + k_{\text{ДН}}.$$

Приведем полученные соотношения для расчета коэффициентов регулятора “динамики” в обратных связях по координатам состояния и регулятора “статики”:

$$\begin{cases} h_1 = S_2\Omega - \frac{B_1}{A_1} \\ h_0 = S_1\Omega^2 - \frac{(C_1 + C_2)}{A_1} \\ k_{\text{ДН}} = \Omega^3 \end{cases} \quad (3)$$

Обозначения параметров соответствуют выражениям (1), (2).

Модальный метод управления процессом адаптации с введением астатизма дает возможность обеспечить желаемые показатели качества процесса, необходимое быстродействие и требуемую статическую точность перемещения по координате адаптации [13].

Наблюдатели состояния процесса адаптации

Изложенный подход к синтезу управления процессом адаптации требует замыкания обратных связей по всем без исключения координатам состояния, однако возможность полных измерений на практике ограничена. В большинстве случаев параметры движения соединяемых деталей (скорости, ускорения, рывки и т.д.) по разным причинам не подлежат

прямым измерениям. Для получения информации о текущих значениях неизмеряемых переменных состояния разрабатывают специальные вычислительные алгоритмы (и реализующие их устройства), называемые наблюдателями [8].

Выходом наблюдателя является оценка $\tilde{X}(t)$ координат состояния процесса, причём $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{X}(t) = X(t)$.

Наблюдателем полного порядка является динамическая система (модель Люенбергера):

$$\begin{cases} \dot{\tilde{X}} = \Lambda\tilde{X} + \hat{A}U + L(Y - \tilde{Y}) \\ \tilde{Y} = C\tilde{X} \end{cases}, \quad (4)$$

где \tilde{Y} – вектор оценок выходных переменных; L – матрица коэффициентов.

Наблюдатель (4) отличается по структуре от модели объекта (1) наличием слагаемого $L(Y - \tilde{Y})$, называемого “стабилизирующей добавкой” (позволяющей воздействовать на статические ошибки наблюдения).

Коэффициенты “стабилизирующей добавки” определяют аналогично, приравнявая характеристический полином наблюдателя

$$D_i(p) = p^2 + \left(l_1 + \frac{B_1}{A_1}\right)p + \left(l_2 + \frac{(C_1 + C_2)}{A_1}\right)$$

к желаемому $N_i(p) = p^2 + S_1\Omega_H p + \Omega_H^2$, для которого среднегеометрический корень – $\Omega_H = (5 \dots 10)\Omega$.

Увеличение среднегеометрического корня Ω_H по отношению к Ω позволяет разнести темпы процессов в системе с модальным регулятором и в подсистеме оценивания координат состояния, благодаря чему наличие наблюдателя не оказывает существенным образом влияния на динамику системы управления.

Таким образом, компоненты матрицы коэффициентов L определяются:

$$\begin{cases} l_1 = S_1\Omega_H - \frac{B_1}{A_1} \\ l_2 = \Omega_H^2 - \frac{(C_1 + C_2)}{A_1} \end{cases}. \quad (5)$$

Структурная схема наблюдателя полного порядка, оценивающего переменные состояния

$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix}$ процесса адаптации по выходу Y ,

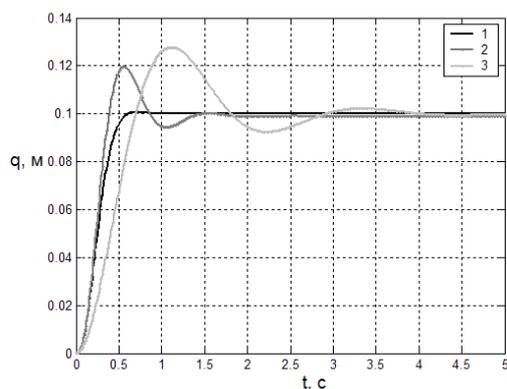
представлена на рис. 4.

модальном управлении. Предполагается, что математическую модель объекта (процесса перемещения детали по координате адаптации) возможно идентифицировать экспериментально, как динамическое звено второго порядка. Идентифицируемые параметры: коэффициент передачи $k = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$; постоянная времени

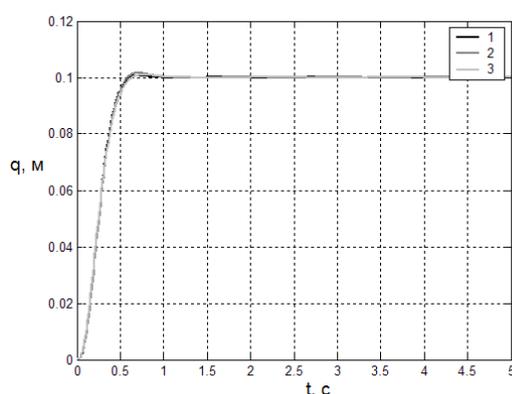
$$T = \sqrt{\frac{A_1}{C_1 + C_2}}; \text{ коэффициент демпфирования}$$

$$\xi = \frac{B_1}{2\sqrt{A_1(C_1 + C_2)}}. \text{ Выявлено, что система мо-}$$

дального управления наиболее требовательна к точности оценки коэффициента передачи, определяемого упругими свойствами взаимодействующих элементов, и наименее – к точности оценки коэффициента демпфирования, в основном определяемого диссипативным свойством среды.



а)



б)

Рис. 6. Исследование чувствительности к отклонениям в оценке состояний процесса адаптации при астатическом модальном управлении с применением наблюдателей: полного (а) и пониженного (б) порядков:

- 1 – эталонная система;
- 2 – система, в которой присутствует погрешность в оценке координат состояния, равная 1 %;
- 3 – система, в которой имеется задержка расчета координат состояния, равная 0,01 с

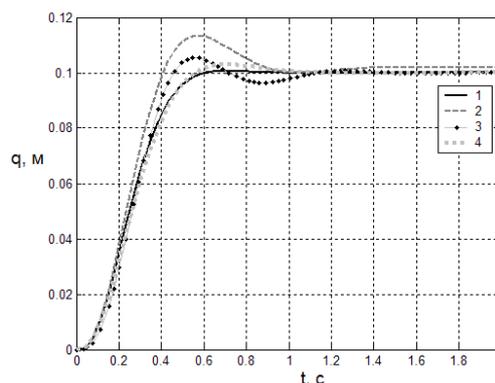


Рис. 7. Исследование влияния отклонения параметров объекта на качество процесса адаптации при астатическом модальном управлении:

- 1 – эталонная система;
- 2 – система, в которой погрешность в оценке коэффициента передачи модели объекта составляет 1 %;
- 3 – система, в которой погрешность в определении постоянной времени объекта равна 50 %;
- 4 – система, в которой идентифицируемый коэффициент демпфирования объекта отличается от истинного более чем в 100 раз

Путем имитационного моделирования выявлено, что характер изменения управляющего воздействия $U(t)$ (смещения во времени), формируемого устройством перемещения детали, соответствует желаемому процессу движения. Для его реализации необходимо высокоточное устройство перемещения (привод), постоянная времени которого должна быть на порядок меньше чем у процесса адаптации. При моделировании для более наглядного представления динамических процессов выбранные коэффициенты отличаются от реальных значений (предполагаемые реальные значения $C_1, C_2 \approx 10^5 \dots 10^9 \frac{H}{i}$; $B_1 \approx (9 \dots 30) \cdot 10^{-6} \frac{H \cdot c}{m}$). По предварительным подсчетам реальная постоянная времени процесса может составлять десятки микросекунд. Вряд ли современный уровень развития техники обеспечит соответствующее быстродействие устройств перемещения. Это еще одно уязвимое место синтезируемого управления.

Заключение

Результаты выполненной работы следующие:

1. С целью обеспечения качественных показателей процесса сборки синтезировано управление движением детали в активных средствах адаптации на основе модального метода.

2. В основу синтеза управления положены динамическая модель процесса адаптации детали при сборке и требования к желаемому процессу совмещения.

3. Разработаны структуры и определены соотношения для расчета параметров статической и астатической систем модального управления при полных измерениях переменных состояния процесса адаптации.

4. Предложены структуры наблюдателей, т.е. вычислительных алгоритмов, осуществляющих оценку координат состояния процесса при отсутствии возможности прямого измерения параметров движения соединяемых деталей (скоростей, смещений, рывков и т.д.).

5. Проведенный путем имитационного моделирования анализ робастности предложенного управления позволил установить, что синтезированная система наиболее требовательна к точности оценки коэффициента передачи, определяемого упругими свойствами взаимодействующих элементов, и наименее – к точности оценки коэффициента демпфирования, в основном определяемого диссипативными свойствами среды. Выявлено, что даже незначительные погрешности или запаздывание в оценке наблюдателями состояний приводят к существенному ухудшению качества процесса.

6. Недостатком синтезированного управления по состоянию процессом адаптации, препятствующим его практической реализации на данном этапе исследований, является требование точной идентификации значений параметров математической модели.

Литература

1. Управление дискретными процессами в ГПС/ Л.С. Ямпольский, З. Банашак, К. Хасегава, Б. Крог, К. Такахаши, А.В. Бурсан. Киев: Техника; Вроцлав: Изд-во Вроцлав. политехн. ин-та; Токио: Токосё, 1992. 251 с.
2. Active adaptation in robotic assembly/ M.V. Vartanov, M.V. Arkhipov, V.K. Petrov, R.S. Mishchenko //

Russian engineering research. Allerton Press, Inc. (New York). 2017. V. 3. № 9. P. 814-816.

3. Adaptation of Force Control Parameters in Robotic Assembly /A. Stolt, M. Linderoth, A. Robertson, R. Johansson // 10th IFAC Symposium on Robot Control, 2012, p. 561-566.

4. Бедрин В.М., Бедрина А.В. Обзор методов и устройств автоматического ориентирования деталей при сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2000. №2. С. 7-21.

5. Козырев Ю.Г. Устройства корректировки положения сопрягаемых деталей при сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. №12. С. 17-21.

6. Кузнецова С.В., Симаков А.Л., Кабаева О.Н. Проектирование и исследование средства автоматизации сборочной операции // Автоматизация в промышленности. 2019. №11. С. 47-51.

7. Кузнецов М.В., Симаков А.Л. Сравнительный анализ регуляторов в средствах активной адаптации для автоматизированной сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. №3. С. 13-21.

8. Панкратов В.В., Нос О.Б., Зима Е.А. Специальные разделы современной теории автоматического управления: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 220 с.

9. Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Модель, описывающая динамику движения детали по координатам совмещения, относительной и угловой адаптации при сборке // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. Т.3. №3. URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2017/09/2017-N3-KuznetsovaSimakov.pdf> (дата обращения: 13.07.2020).

10. Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Условия автоматизированного согласования взаимного положения сборочных компонент // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. №9. С. 402-409.

11. Кузнецова С.В. Синтез управления рассогласованием деталей при сборке в активных средствах адаптации методом обратной задачи динамики. // Современные технологии сборки: материалы VI междунар. науч.-техн. семинара. М.: Московский политех, 2019. С. 108-118.

12. Кузнецова С.В., Тетеркина Е.А. Разработка модели системы модального управления процессом адаптации детали при сборке // Вестник современных исследований. 2018. Вып. №8-3 (23). С. 314-320.

13. Кузнецова С.В., Тураева З.Ф. Имитационная модель системы модифицированного модального управления координатой адаптации детали при сборке // Вестник современных исследований. 2018. Вып. №8-3 (23). С. 321- 326.

Поступила 21.05.2020; принята к публикации 17.08.2020

Информация об авторах

Кузнецова Светлана Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева (601910, Россия, г. Ковров, ул. Маяковского, 19), тел. 8-904-654-83-02, e-mail: svkuznecova@gmail.com
Симаков Александр Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева (601910, Россия, г. Ковров, ул. Маяковского, 19), e-mail: alsimakov@mail.ru

CONTROL SYNTHESIS IN ACTIVE MEANS OF PART ADAPTATION DURING AUTOMATED ASSEMBLY

S.V. Kuznetsova, A.L. Simakov

Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Kovrov, Russia

Abstract: an important aspect of the problem of automation of assembly operations is the adaptation of parts. The means of adaptation or correction of the position of the parts are engineering techniques aimed at reducing the mismatch between the compatible surfaces of the assembly components with the aim of pairing. The development of adaptation tools is possible due to the search for new design solutions, improvement of the existing components, and synthesis of motion control algorithms for connected parts. The article discusses the latter direction, namely, the approach to the synthesis of control of the movement of the part in active means of adaptation during assembly. The purpose is to find an algorithm that ensures the accuracy and smoothness of the movement of the part, necessary to prevent jamming, collision, and rebound processes. The control action is synthesized by the modal control method. The method is based on the construction of a mathematical model of the object - the process of adaptation of the part in state variables. The process state variables are the coordinate of adaptation and the speed of movement of the part. The observer structures, i.e. special computational algorithms used when it is not possible to measure (complete or incomplete) process state variables. By means of simulation modeling, the influence of deviations of object parameters and estimates of state variables on the quality of the adaptation process is investigated

Key words: automated assembly, part movement on coordinate of adaptation, mathematical model, modal control, observer, control synthesis

References

1. Yampol'skiy L.S., Banashak Z., Hasegawa K., Krog B., Takahashi K., Borusan A.V. "Management of discrete processes in flexible manufacturing systems" ("Upravlenie diskretnymi protsessami v GPS"), Kiev, Technika; Wroclaw, Publishing House Wroclaw, Polytechnic institute; Tokyo, Tokosho, 1992, 251 p.
2. Vartanov M.V., Arkhipov M.V., Petrov V.K., Mishchenko R.S. "Active adaptation in robotic assembly", *Russian Engineering Research*, Allerton Press, Inc. New York, 2017, vol. 3, no. 9, pp. 814-816.
3. Stolt A., Linderoth M., Robertson A., Johansson R. "Adaptation of force control parameters in robotic assembly", *10th IFAC Symposium on Robot Control*, 2012, pp. 561-566.
4. Bedrin V.M., Bedrina A.V. "Overview of methods and devices for automatic orientation of parts during assembly", *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Making (Sborka v mashinostroenii, priborostroenii)*, 2000, no. 2, pp. 7-21.
5. Kozyrev Yu.G. "Devices for adjusting the position of mating parts during assembly", *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Making (Sborka v mashinostroenii, priborostroenii)*, 2003, no. 12, pp. 17-21.
6. Kuznetsova S.V., Simakov A.L., Kabaeva O.N. "Design and research of automation equipment for assembly operations", *Automation in Industry (Avtomatizatsiya v promyshlennosti)*, 2019, no. 11, pp. 47-51.
7. Kuznetsov M.V., Simakov A.L. "Comparative analysis of regulators in means of active adaptation for automated assembly", *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Making (Sborka v mashinostroenii, priborostroenii)*, 2008, no. 3, pp. 13-21.
8. Pankratov V.V., Nos O.B., Zima E.A. "Special sections of the modern theory of automatic control" ("Spetsial'nye razdely sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya"), textbook, Novosibirsk, Publishing house of NSTU, 2007, 220 p.
9. Kuznetsova S.V., Simakov A.L. "Model that describes the dynamics of the movement of a part along the coordinates of alignment, relative and angular adaptation during assembly", *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia (Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii)*, 2017, vol. 3, no. 3, available at: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2017/09/2017-N3-KuznetsovaSimakov.pdf> (date of access: 13.07.2020).
10. Kuznetsova S.V., Simakov A.L. "Conditions for automated coordination of the mutual position of assembly components", *Assembly in Mechanical Engineering, Instrument Making (Sborka v mashinostroenii, priborostroenii)*, 2019, no. 9, pp. 402-409.
11. Kuznetsova S.V. "Synthesis of the control of the mismatch of parts during assembly in active means of adaptation by the inverse dynamics problem method", *Modern Assembly Technologies. Proc. of the VI International Scientific and Technical Seminar (Sovremennye tekhnologii sborki: materialy VI mezhdunar. nauch.-tekhn. seminar)*, Moscow, Moscow Polytechnic University, 2019, pp. 108-118.
12. Kuznetsova S.V., Teterkina E.A. "Development of a model of a modal control system for the adaptation process of a part during assembly", *Bulletin of Modern Research (Vestnik sovremennykh issledovaniy)*, 2018, issue 8-3 (23), pp. 314-320.
13. Kuznetsova S.V., Turaeva Z.F. "Simulation model of a modified modal control for the coordinate of adaptation of a part during assembly", *Bulletin of Modern Research (Vestnik sovremennykh issledovaniy)*, 2018, issue 8-3 (23), pp. 321- 326.

Submitted 21.05.2020; revised 17.08.2020

Information about the authors

Svetlana V. Kuznetsova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev (19 Mayakovsky str., Kovrov 601910, Russia), e-mail: svkzynecova@gmail.com, tel.: 8-904-654-83-02, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6948-0362>

Aleksandr L. Simakov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev (19 Mayakovsky str., Kovrov 601910, Russia), e-mail: alsimakov@mail.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ БОУКА-ВЕНА НА ФОРМУ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Т.Ю. Заблочкая

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС»,
г. Старый Оскол, Россия

Старооскольский филиал научно-исследовательского университета «Белгородский
государственный университет», г. Старый Оскол, Россия

Аннотация: рассматриваются особенности настройки параметров феноменологической модели Боука-Вена, которая нашла широкое практическое применение и служит универсальной моделью для описания нелинейных процессов и явлений с гистерезисом в различных теоретических и прикладных областях научных знаний. Формулировка модели в виде системы дифференциальных уравнений позволяет изменять режим работы модели в широких пределах путем настройки параметров уравнений, не меняя при этом структуру модели. Выбор значений параметров модели существенно влияет на характеристики гистерезисной кривой и отклик модели на входное воздействие, определяя форму и наклон петли гистерезиса. Оптимальное задание параметров является основой для калибровки модели и управления ею в процессе моделирования реальных нелинейных систем, а также позволяет добиться максимальной точности и адекватного поведения модели. В работе исследуется система основных параметров модели Боука-Вена классического и расширенного типа, описывающих нелинейную систему с гистерезисом с учетом и без учета диссипации энергии соответственно. Также изучается характер отклика модели на возмущающее входное воздействие разного типа. Даются рекомендации относительно оптимального диапазона параметров модели. Приводятся результаты компьютерного моделирования

Ключевые слова: гистерезис, модель Боука-Вена, идентификация параметров, моделирование

Введение

Явление гистерезиса сопровождает многие нелинейные системы, изучаемые в самых разных отраслях – электромеханике, машиностроении, биологии и медицине, что обуславливает необходимость использования математической модели для их адекватного и точного описания. Среди моделей, отражающих суть процессов и явлений с гистерезисом, одной из наиболее эффективных является феноменологическая модель Боука-Вена [1]. В самой простой вариации данная модель сочетает в себе линейную физическую часть в виде уравнения системы с одной степенью свободы и нефизическую гистерезисную часть (уравнения (1)-(3)). Модификации модели содержат от пяти до 13 параметров, настройка которых позволяет изменять форму петли гистерезиса в широких пределах, обеспечивая универсальность модели. Именно от подбора значений параметров зависит конкретный тип гистерезисной кривой как отклика на возмущающее воздействие. При этом нелинейный характер уравнений затрудняет процедуру идентификации параметров, от которой зависит точность и прогнозируемость результатов моделирования.

Настройка модели подразумевает такой подбор ее параметров, который обеспечит минимальное расхождение между откликом модели на входной сигнал и экспериментальными данными для одного и того же типа входного воздействия. Для решения задачи идентификации параметров используют разные подходы: генетические [2] и эволюционные [3] алгоритмы, байесовские методы [4], методы адаптивного слежения [5] и локальной чувствительности модели [6], а также экспериментальные методы [7, 8], которые косвенным образом подтверждают универсальность модели Боука-Вена. В работе [9] предлагается использовать модель Боука-Вена в качестве гистерезисного преобразователя для активации сигналов искусственной нейронной сети на базе биологического нейрона. Для этого необходимо изучить поведение модели Боука-Вена при различных значениях параметров.

Целью настоящей работы является изучение типовых моделей Боука-Вена и выявление влияния каждого из параметров модели на форму петли гистерезиса.

Описание модели Боука-Вена

Модель Боука-Вена является феноменологической универсальной моделью, одной из

самых распространенных для описания широко класса явлений с гистерезисом. Модель может быть описана дифференциальным уравнением или системой дифференциальных уравнений. Классическая формулировка модели включает в себя пять параметров гистерезиса – $A, \alpha, \beta, \gamma, n$, которые описывают характер гистерезисной кривой:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + F_R = F(t); \quad (1)$$

$$F_R = \alpha k u + (1 - \alpha) k z; \quad (2)$$

$$\dot{z} = A\dot{u} - \beta|\dot{u}|z^{n-1}z - \gamma\dot{u}|z|^n, \quad (3)$$

где F_R – возвращающая сила, z – гистерезисная составляющая, называемая также гистерезисным смещением; коэффициент жесткости k в уравнении (3) представлен произведением $A\dot{u}$.

В некоторых работах [10, 11] параметр α не включают в систему идентификации параметров модели, поскольку он представляет собой отношение между коэффициентами k_f и k_i , характеризующими гистерезисную нелинейность и линейную жесткость модели соответственно:

$$\alpha = \frac{k_f}{k_i}.$$

Модификация модели Боука-Вена представляет собой расширенную модель, учитывающую эффекты деградации и сжатия петли, обусловленные диссипативностью реальных систем с гистерезисом [12, 13]. Такая модель содержит 13 параметров, от которых зависит форма петли гистерезиса. Они представлены уравнениями (4)-(11), в рамках которых переменная \dot{z} из уравнения (3) определяется выражением (4) с максимальным значением (5)

$$\dot{z} = h \cdot \frac{1}{\eta} \left(A\dot{u} - v(\beta|\dot{u}|z^{n-1}z - \gamma\dot{u}|z|^n) \right); \quad (4)$$

$$z_{\max} = \sqrt[n]{\frac{A}{v(\beta + \gamma)}}. \quad (5)$$

Здесь $A, \alpha, \beta, \gamma, n$ – параметры из классической модели (1)-(3). Диссипацию энергии в системе описывает величина

$$\varepsilon = \int_0^t z\dot{u}dt. \quad (6)$$

Деградацию силы и жесткости описывают параметры v и η :

$$v = 1 + \delta_v \varepsilon; \quad (7)$$

$$\eta = 1 + \delta_\eta \varepsilon; \quad (8)$$

где δ_v и δ_η – характеризуют снижение силы и жесткости соответственно.

Сжатие петли описывается функцией:

$$h = 1 - \xi_1 e^{-\frac{(z \operatorname{sgn}(u) - q z_{\max})^2}{\xi_2^2}}, \quad (9)$$

где величина ξ_1 определяет степень сжатия петли и угол наклона, $0 \leq \xi_1 < 1$; ξ_2 характеризует область сжатия на гистерезисной кривой:

$$\xi_1 = \xi_s (1 - e^{-p\varepsilon}); \quad (10)$$

$$\xi_2 = (\psi + \delta_\psi \varepsilon)(\lambda + \xi_1). \quad (11)$$

Здесь параметры $\lambda, q, p, \psi, \delta_\psi, \xi_s$ отвечают за сжатие петли: p задает крутизну наклона области сжатия, ξ_s определяет смещение: чем больше значение параметра, тем сильнее сжатие петли; ψ и δ_ψ влияют на протяженность сжатия относительно всей петли, λ задает взаимосвязь между ξ_1 и ξ_2 . При $v = \eta = h = 1$ получаем стандартную петлю без сжатия (1)-(3).

Различия для двух рассмотренных типов модели в отклике на входное воздействие показаны на рис. 1.

Существуют другие модификации модели, насчитывающие семь и более параметров в зависимости от тех свойств нелинейных систем, которые представлены в системе дифференциальных уравнений [10-14]. Тем не менее, все они относятся к одному из описанных выше типов. В рамках данной работы ограничимся изучением классической модели Боука-Вена и ее параметров.

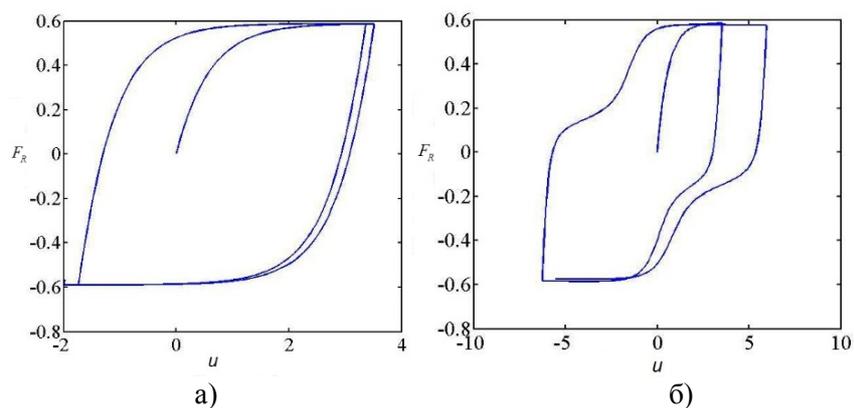
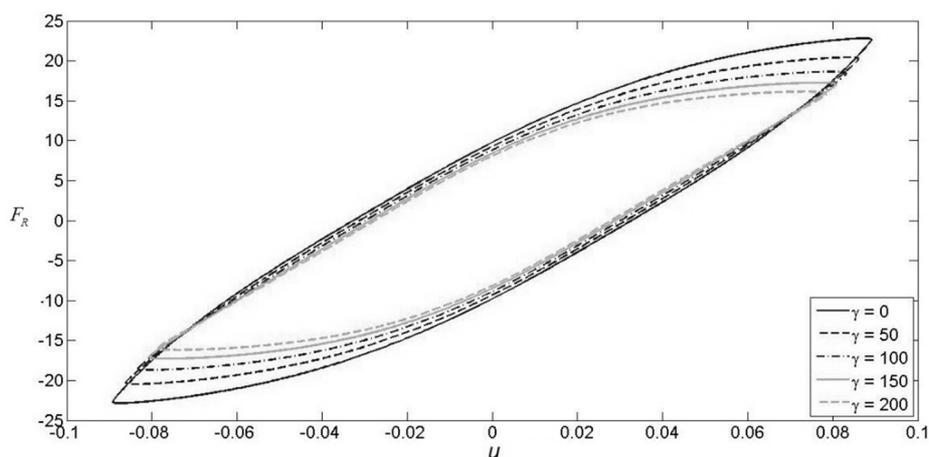
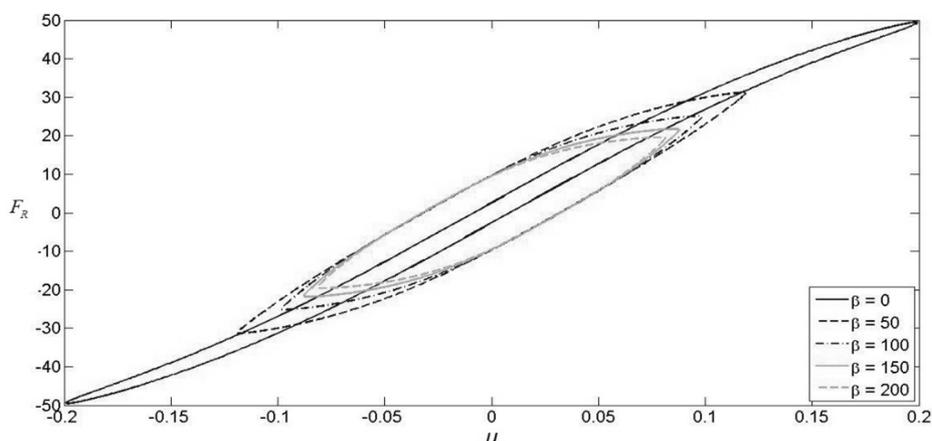


Рис. 1. Пример петли гистерезиса для классической (а) и расширенной (б) моделей Боука-Вена

Параметры, характеризующие форму петли гистерезиса

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют, что форму петли гистерезиса, в основном, определяют три параметра – β , γ , n , и их взаимосвязь. Модель обладает малой чувствительностью по отношению к абсолютным

значениям β и γ , если они изменяются пропорционально, однако если абсолютные значения этих параметров велики ($|\beta| > 50$ и $|\gamma| > 50$), резко возрастает зашумленность. Жесткость и сила гистерезиса, а также плавность перехода пропорциональны абсолютным значениям β и γ соответственно, но при этом диапазон изменений невелик (рис. 2, 3).

Рис. 2. Влияние параметра γ на форму петли гистерезисаРис. 3. Влияние параметра β на форму петли гистерезиса

Большой чувствительностью гистерезис обладает к разности значений β и γ – комбинация этих параметров определяет, какой тип гистерезисной связи будет описывать модель, более жесткую или более мягкую (рис. 4).

Так, условия $\begin{cases} \beta + \gamma > 0 \\ \gamma - \beta < 0 \end{cases}$ задают слабое смягчение; при замене второго условия равенством получим слабое смягчение (эластичность) при квазилинейном нагружении:

$\begin{cases} \beta + \gamma > 0 \\ \gamma - \beta = 0 \end{cases}$. Сильное смягчение $\begin{cases} \beta + \gamma > \beta - \gamma \\ \beta - \gamma > 0 \end{cases}$ сужает петлю гистерезиса под нагрузкой и без нее (рис. 5,а); условия $\begin{cases} \beta + \gamma = 0 \\ \gamma - \beta < 0 \end{cases}$ и $\begin{cases} \beta + \gamma < 0 \\ \beta + \gamma > \gamma - \beta \end{cases}$ описывают слабое и сильное ужесточение соответственно (рис. 5,б).

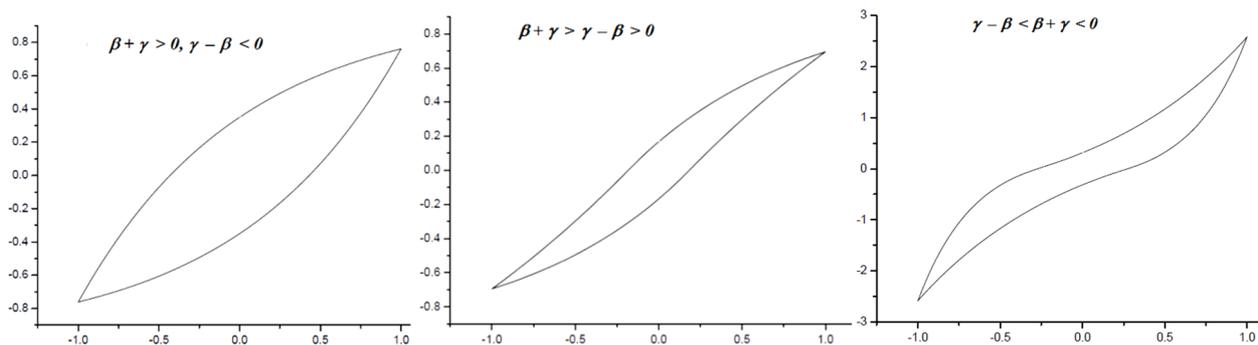


Рис. 4. Форма петли гистерезиса при различных комбинациях значений параметров β и γ

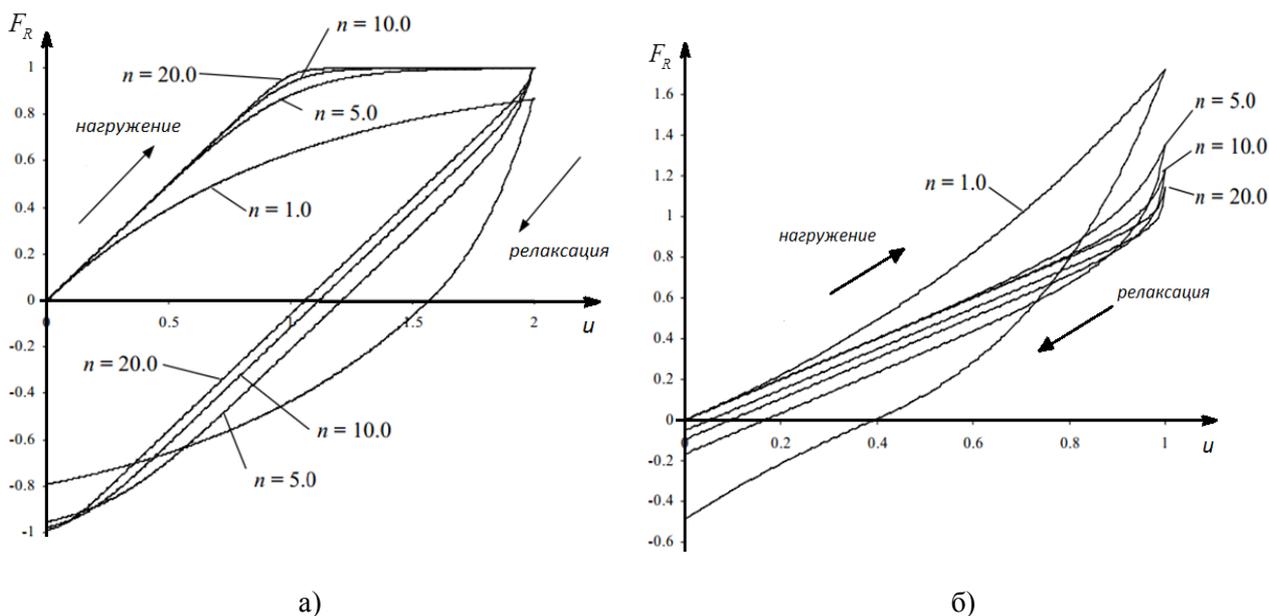


Рис. 5. Зависимость смещения u от возвращающей силы F_R при изменении параметров модели Боука-Вена: а) параметры нагружения: $\dot{u} = 0,1$, релаксации: $\dot{u} = -0,1$, $\beta + \gamma > 0$, $\beta = 2$, $\gamma = -1$, $\alpha = 0$; б) параметры нагружения: $\dot{u} = 0,1$, релаксации: $\dot{u} = -0,1$, $0 > \beta + \gamma > \gamma - \beta$, $\beta = 1$, $\gamma = -2$, $\alpha = 0$

Также увеличение параметра n делает кривую петли более мягкой при неизменных значениях остальных параметров, под нагрузкой параметр n задает плавность перехода от первоначальной кривой к асимптотической, к которой $z(t)$ приближается при мягком гисте-

резисе. С ростом n кривая нагрузки при мягком гистерезисе приближается к идеальной кривой упругой деформации, в то время как форма обратной кривой (без нагрузки) стремится к прямой линии (рис. 5,а). При жестком гистерезисе наблюдается другая форма петли

гистерезиса – большие значения параметра n вызывают сужение петли, делая переход между фазами более резким (рис. 5,б). Также при $\beta < 0$ поведение модели соответствует более мягкому гистерезису, при $\beta > 0$ – более жест-

кому, а при $\beta = 0$ гистерезис переходит в линейную стадию (рис. 6,б). От параметра A зависит амплитуда гистерезиса, он влияет на ширину и наклон петли (рис. 6,а).

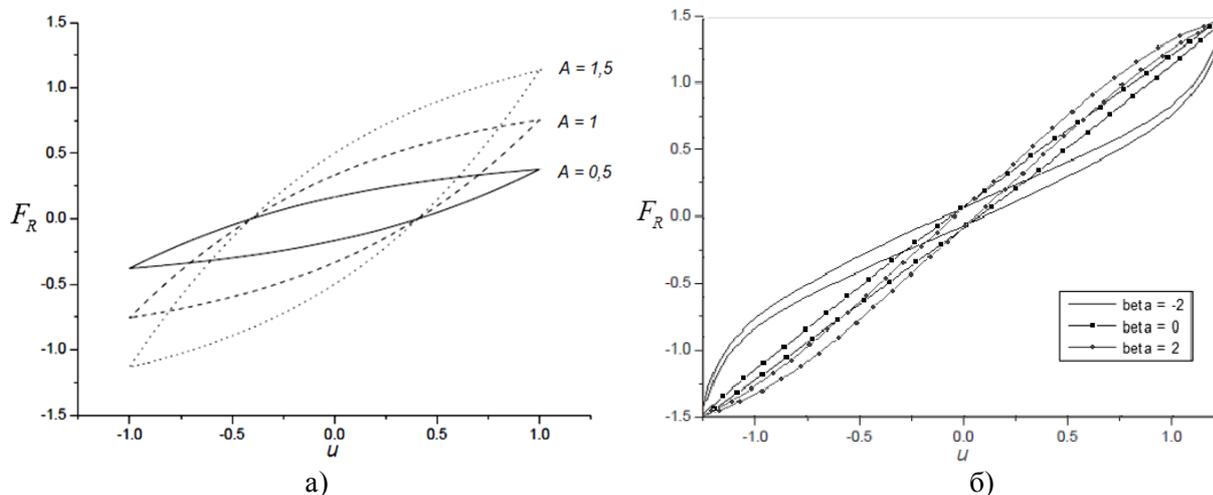


Рис. 6. Влияние параметров на форму петли гистерезиса в модели:
 а) $A = \text{var} (\beta = 0,1; \gamma = 0,9; n = 1)$; б) $\beta > 0; \beta = 0; \beta = 0; \beta = 0,1 (A = 1; \gamma = 0,9; n = 1)$

Таблица 1

Влияние параметров модели Боука-Вена на форму петли гистерезиса

Параметр		Эффект (соответствует увеличению параметра)
α	коэффициент жесткости	петля становится шире
β	отвечает за форму петли гистерезиса	петля стремится к вертикальному расположению и прямолинейному контуру
γ	отвечает за форму петли гистерезиса	петля становится шире
A	характеризует амплитуду петли	ширина петли растет
n	отвечает за форму петли гистерезиса	петля становится уже

Из результатов моделирования можно сделать следующие выводы (табл. 1): большим значениям параметров α , γ и A соответствует более широкая петля гистерезиса, рост β сдвигает ориентацию петли к более вертикальному положению и уменьшает наклон; увеличение собственной частоты ω_n сужает петлю и увеличивает наклон кривых.

Полученные данные согласуются с результатами исследований других авторов [7, 14-17]. Также проанализировав допустимые значения параметров модели, в рамках которых происходит устойчивое формирование полной закрытой петли гистерезиса [10, 16, 18], можно сделать вывод об оптимальном диапазоне параметров, обеспечивающем наибольшую точность модели (табл. 2).

Руководствуясь данными значениями, был проведен тест модели Боука-Вена при подаче на ее вход сигналов разного типа (рис. 7). В

качестве входных сигналов использовались периодический сигнал $u(t) = X \sin(\omega t)$ (рис. 7, а) как простой и удобный способ тестирования системы на нелинейность в виде отклонения от синусоиды на выходе и стохастический сигнал (рис. 7, б).

Таблица 2

Оптимальные значения параметров модели Боука-Вена

Параметр	Нижняя граница	Верхняя граница
α	0.2	0.8
β	3.0	5.0
γ	1.1	3.0
A	0.4	1.1
n	1.0	2.0

Значения параметров модели: $\alpha = 0,4$, $\beta = 4,0$, $\gamma = 2,0$, $A = 1$, $n = 1$.

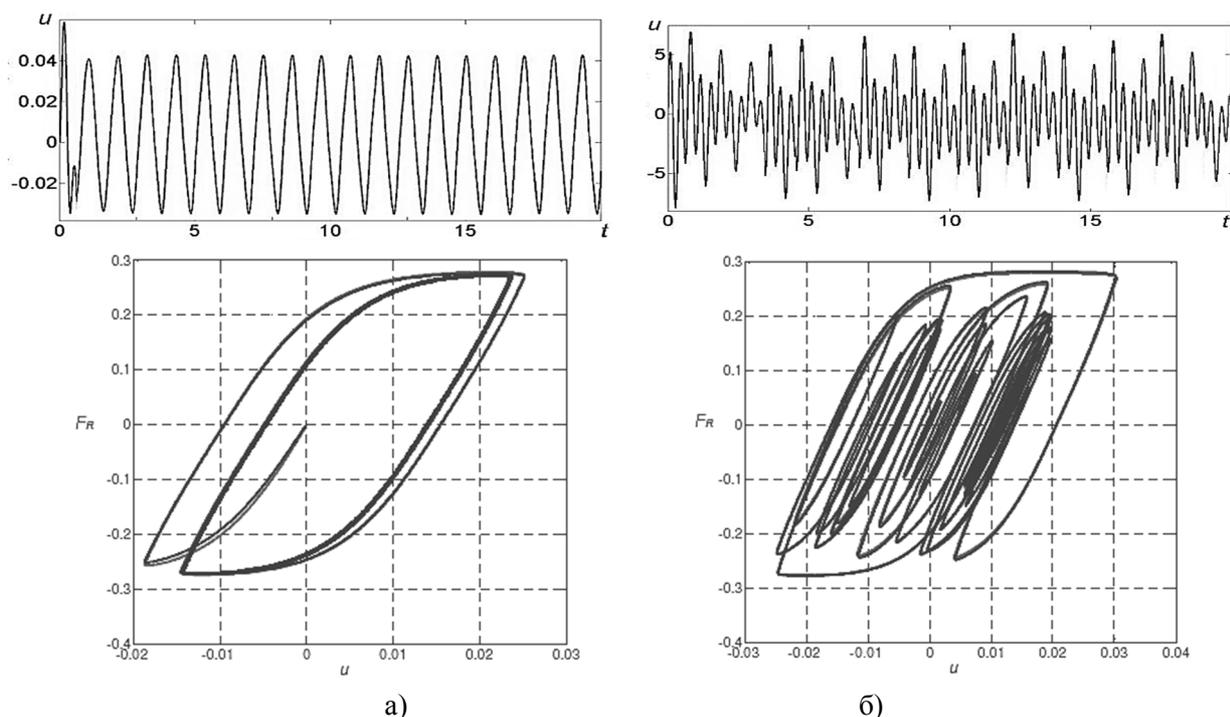


Рис. 7. Отклик модели на периодический входной сигнал $u(t) = X \sin(\omega t)$ (а) и на стохастический сигнал (б)

Выбранный диапазон параметров (табл. 2) приводит к адекватной работе модели для систем с определенным типом гистерезисной кривой. В случае, если форма петли сильно отличается от «классической» по форме и/или наклону, рабочий диапазон параметров потребует корректировки. Также для расширенной модели Боука-Вена анализ ее параметров потребует проведения дополнительных испытаний.

Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- 1) изучены и проанализированы аналитические описания двух вариантов феноменологической модели Боука-Вена – классической модели и ее расширенной модификации с увеличенным числом параметров;
- 2) проведено детальное исследование пяти основных параметров классической модели Боука-Вена и влияния каждого из них на форму петли гистерезиса;
- 3) выполнено компьютерное моделирование для классической модели Боука-Вена при заданном входном периодическом сигнале;
- 4) сформулирован оптимальный рабочий диапазон значений параметров классической

модели Боука-Вена для получения полной замкнутой петли при моделировании;

5) сделаны выводы относительно полученных результатов.

Полученные данные позволяют говорить о возможности оптимальной настройки параметров модели, обеспечивающих ее стабильный отклик на периодическое входное воздействие, а также об адекватном использовании модели Боука-Вена при описании работы нелинейных систем, в том числе в качестве гистерезисного преобразователя. При этом, в зависимости от особенностей моделируемого нелинейного процесса и/или системы и типа входного сигнала, калибровка параметров модели Боука-Вена позволит настроить ее наилучшим образом на описание изучаемого явления, не прибегая к изменениям в структуре самой модели.

Литература

1. Charalampakis Aristotelis E. Parameters of Bouc-Wen Hysteretic Model Revisited// 9th HSTAM International Congress on Mechanics, Limassol, Cyprus 12-14 July, 2010, URL: <https://www.charalampakis.com/files/c09.pdf>
2. Bartkowski P., Zalewski R., Chodkiewicz P. Parameter identification of Bouc-Wen model for vacuum packed particles based on genetic algorithm// Arch. Civil Mech. Eng. 2019. №19(2). pp. 322–333.
3. Laudani A., Fulginei F.R., Salvini A. Bouc-Wen hysteresis model identification by the metric-topological evolutionary optimization// IEEE Trans. Magn. 2014. №50(2). pp. 621-624.

4. Worden K., Hensman J.J. Parameter estimation and model selection for a class of hysteretic systems using Bayesian inference// *Mechanical Systems and Signal Proc.* 2012. №32. pp.153-169.
5. Yang J. N. and Lin S. On-line identification of nonlinear hysteretic structures using an adaptive tracking technique// *International Journal of Non-Linear Mechanics.* 2004. №39(9). pp. 1481-1491.
6. Parameter Estimation and its Sensitivity Analysis of the MR Damper Hysteresis Model Using a Modified Genetic Algorithm/ X. Xiaomin, Qing S. et al.// *Journal of Intelligent Material Systems and Structures.* 2009. № 20(17). pp. 2089-2100.
7. Carboni B., Mancini C., Lacarbonara W. Hysteretic Beam Model for Steel Wire Ropes Hysteresis Identification// *Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis.* 2015. Vol. 168. pp. 261–282.
8. Carboni B., Lacarbonara W. Nonlinear dynamic characterization of a new hysteretic device: Experiments and computations// *Nonlinear Dynamics.* 2016. Vol. 83. pp. 23–39.
9. Semenov M.E., Zablotskaya T.Yu. Choosing the model of biological neural network for image segmentation of a bio-liquid facie // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2019. Т. 26. № 1. С. 70-85. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-26-1-70-85.
10. Ismail M., Ikhouane F., Rodellar J. The hysteresis Bouc-Wen model, a survey//*Archives of Computational Methods in Engineering.* 2009. Vol. 16. No. 2. pp. 161–188.
11. Dynamical response identification of a class of nonlinear hysteretic systems/B. Carboni, W. Lacarbonara, P.T. Brewick, S.F. Masri// *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2018. № 29(13). PP. 2795–2810
12. A Novel Similarity-Based Hysteresis Empirical Model for Piezoceramic Actuators/ Zhi-Lin Lai, Zhen Chen, Xiang-Dong Liu, Qing-He Wu// *Sensors & Actuators: A. Physical.* 2013. Vol. 197. pp. 150-165.
13. Bouc–Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA/ N.M. Kwok, Q.P. Ha, M.T. Nguyen, J. Li, B. Samali// *ISA Transactions.* 2007. № 46. pp. 167–179.
14. Modelling and identifying the parameters of a magneto-rheological damper with a force-lag phenomenon/ G.R. Peng, W.H. Li, H. Du, H.X. Deng, G. Alici// *Applied Mathematical Modelling: simulation and computation for engineering and environmental systems.* 2014. № 38 (15-16). pp. 3763-3773.
15. Parameter analysis of the differential model of hysteresis/ F. Ma, H. Zhang, A. Bockstedte, G.C. Foliente and P. Paevere // *Journal of Applied Mechanics.* 2004. №71(3). pp. 342–349.
16. Solomon Ovidiu. Some Typical Shapes of Hysteretic Loops Using the Bouc-Wen Model// *Journal of Information Systems and Operations Management.* 2013. №7(1). pp. 73-82.
17. Semenov M.E., Solovyov A.M., Meleshenko P.A. Elastic inverted pendulum with hysteretic nonlinearity in suspension: stabilization problem//*Nonlinear Dynamics.* 2015. №82. pp. 677–688.
18. Ikhouane F., Hurtado J.E. and Rodellar J. Variation of the hysteresis loop with the Bouc-Wen model parameters// *Nonlinear Dyn.* 2007. № 48(4). pp. 361-380.

Поступила 29.06.2020; принята к публикации 17.08.2020

Информация об авторах

Заблочкая Татьяна Юрьевна – аспирант, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС» (309516, Россия, г. Старый Оскол, м-н Макаренко, 42), преподаватель, Старооскольский филиал научно-исследовательского университета «Белгородский государственный университет» (309502, Россия, г. Старый Оскол, м-н Солнечный, 18), e-mail: zablotskaja_t@mail.ru

ANALYSIS OF THE BOUC-WEN MODEL PARAMETER EFFECT ON HYSTERESIS LOOP

T.Yu. Zablotskaya

A.A. Ugarov Technological Institute of National University of Science and Technology "MISIS" (Stary Oskol branch), Stary Oskol, Russia
Belgorod State University (Stary Oskol branch), Stary Oskol, Russia

Abstract: in the paper, the peculiarities of parameter setting of phenomenological Bouc-Wen model are analyzed as it is widely adopted for functional description of various nonlinear hysteretic systems and phenomena due to its versatility and feasibility for vast theoretical and engineering scientific fields. Being formulated as a differential equation system, the model enables it to be retuned and adjusted to new operation mode through the equations parameter setting while the model structure remains unchangeable. The parameter values influence the hysteresis loop significantly effecting its shape and size and thus, the model response to input disturbance consequently. Identifying the parameter values, the best performance of the model can be set, which means the accurate and adequate behaviour of the model. Therefore, the key parameters of the Bouc-Wen model standard and extended types are studied and classified throughout the paper depending on their values impacting on the shape and size of hysteretic curve and response of the model. The efficient parameter ranges are recommended to provide the adequate model response. The Bouc-Wen response was modelled at various parameter values and inputs

Key words: hysteresis, the Bouc-Wen model, parameter identification, modelling

References

1. Charalampakis Aristotelis E. "Parameters of Bouc-Wen hysteretic model revisited", *9th HSTAM International Congress on Mechanics*, Limassol, Cyprus 12-14 July, 2010, available at: <https://www.charalampakis.com/files/c09.pdf>.
2. Bartkowski P., Zalewski R., Chodkiewicz P. "Parameter identification of Bouc-Wen model for vacuum packed particles based on genetic algorithm", *Arch. Civil Mech. Eng.*, 2019, no. 19(2), pp. 322–333.
3. Laudani A., Fulginei F. R., Salvini A. "Bouc-Wen hysteresis model identification by the metric-topological evolutionary optimization", *IEEE Trans. Magn.*, 2014, no. 50(2), pp. 621–624.
4. Worden K., Hensman J.J. "Parameter estimation and model selection for a class of hysteretic systems using Bayesian inference", *Mechanical Systems and Signal Proc.*, 2012, no. 32, pp. 153–169.
5. Yang J.N., Lin S. "On-line identification of non-linear hysteretic structures using an adaptive tracking technique", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2004, no. 39(9), pp. 1481–1491.
6. Xiaomin X., Qing S. et al. "Parameter estimation and its sensitivity analysis of the MR damper hysteresis model using a modified genetic algorithm", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2009, no. 20(17), pp. 2089–2100.
7. Carboni B., Mancini C., Lacarbonara W. "Hysteretic beam model for steel wire ropes hysteresis identification", *Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis*, 2015, vol. 168, pp. 261–282.
8. Carboni B., Lacarbonara W. "Nonlinear dynamic characterization of a new hysteretic device: Experiments and computations", *Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 83, pp. 23–39.
9. Semenov M.E., Zablotskaya T.Yu. "Choosing the model of biological neural network for image segmentation of a bio-liquid facie", *Vestnik KRAUNTS. Physics and Mathematics*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 70–85. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-26-1-70-85.
10. Ismail M., Ikhouane F., Rodellar J. "The hysteresis Bouc-Wen model, a survey", *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 161–188.
11. Carboni B., Lacarbonara W., Brewick P.T., Masri S.F. "Dynamical response identification of a class of nonlinear hysteretic systems", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 2018, no. 29(13), pp. 2795–2810.
12. Zhi-Lin Lai, Zhen Chen, Xiang-Dong Liu, Qing-He Wu. "A novel similarity-based hysteresis empirical model for piezoceramic actuators", *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2013, vol. 197, pp. 150–165.
13. Kwok N.M., Ha Q.P., Nguyen M.T., Li, J., Samali B. "Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA", *ISA Transactions*, 2007, no. 46, pp. 167–179.
14. Peng G.R., Li W.H., Du H., Deng H.X., Alici G. "Modelling and identifying the parameters of a magneto-rheological damper with a force-lag phenomenon", *Applied Mathematical Modelling: Simulation and Computation for Engineering and Environmental Systems*, 2014, no. 38 (15–16), pp. 3763–3773.
15. Ma F., Zhang H., Bockstedte A., Foliente G.C., Paevere P. "Parameter analysis of the differential model of hysteresis", *Journal of Applied Mechanics*, 2004, no. 71(3), pp. 342–349.
16. Solomon Ovidiu "Some typical shapes of hysteretic loops using the Bouc-Wen model", *Journal of Information Systems and Operations Management*, 2013, no. 7(1), pp. 73–82.
17. Semenov M.E., Solovyov A.M., Meleshenko P.A. "Elastic inverted pendulum with hysteretic nonlinearity in suspension: stabilization problem", *Nonlinear Dynamics*, 2015, no. 82, pp. 677–688.
18. Ikhouane F., Hurtado J. E., Rodellar J. "Variation of the hysteresis loop with the Bouc-Wen model parameters", *Nonlinear Dyn.*, 2007, no. 48(4), pp. 361–380.

Submitted 29.06.2020; revised 17.08.2020

Information about the authors

Tat'yana Yu. Zablotskaya, Graduate student, A.A. Ugarov Technological Institute of National University of Science and Technology "MISIS" (Stary Oskol branch) (42 distr. Makarenko, Stary Oskol 309516, Russia), Assistant Professor, Belgorod State University (Stary Oskol branch) (18 distr. Solnechnyy, Stary Oskol 309502, Russia), e-mail: zablotskaja_t@mail.ru

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ КОНТРОЛЯ
ПРИ УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОДРОТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ****Ю.Н. Матвеев, М.М. Аль Окаби****Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия**

Аннотация: рассматриваются проблемы, которые возникают при создании автоматизированной системы непрерывного контроля качества (АСУ-К) производства стеклодротов на основе оптических технологий и методов технического зрения, а также пути их решения. Анализ технологического процесса позволил выявить те специфические особенности производства, которые необходимо учитывать на стадии получения качественных изображений объекта контроля с целью их дальнейшей обработки, выделения и распознавания дефектов, определения их локации и протяженности, формирования управляющих воздействий в системе обратной связи. К ним относятся: высокая температура объекта, его сильная вибрация при высокой скорости движения по роликовому конвейеру, необходимость кругового обзора заготовки в процессе ее движения. Изложены методические положения по автоматическому формированию зоны визуального контроля с учетом технологических ограничений. Описан алгоритм формирования зоны контроля на цифровом изображении объекта в условиях его вибрации. Разработана схема расположения оптико-электронного оборудования для кругового обзора непрерывно движущейся горячей трубы. Обоснованы требования к оптико-электронному оборудованию, с учетом температурного режима объекта контроля, скорости его движения и необходимой разрешающей способности

Ключевые слова: поиск дефектов, стеклодроты, контроль качества, цифровые изображения, оптические технологии, техническое зрение

Введение

Одной из ключевых функций предприятия по его управлению является управление качеством изготавливаемой и поставляемой продукции. На уровне управления технологическими процессами эта функция возлагается на автоматизированную систему управления качеством (АСУ-К) продукции, являющуюся одной из компонент автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) и позволяющую автоматизировать процедуру управления качеством на каждом технологическом агрегате. Основная задача АСУ-К - снижение уровня дефектности продукции на этапе ее изготовления в режиме реального времени. Для построения эффективных АСУ-К необходимо решение комплекса задач по разработке информационного, математического и программного обеспечения для контроля параметров производимой продукции и принятия оптимальных решений при управлении качеством готовой продукции.

При производстве стеклодротов неизбежно возникают дефекты [1], такие как отдельные частицы (включения), воздушные пузыри (воздушные линии), гибкие фрагменты, назы-

ваемые ламелями и другие. Эти дефекты приводят к проблемам, связанным с отзывом конечной продукции. По данным [2,3] 18 % фармацевтических продуктов были отозваны из-за проблем с контейнерами. Проверка качества стеклодротов в настоящее время выполняется визуально контролерами ОТК, путем осмотра каждого стеклодрота. Визуальный контроль, используемый для оценки качества изделий, обладает рядом существенных недостатков. Из-за инерции человеческого зрения абсолютно невозможно выполнять непрерывный контроль качества в процессе движения объекта [4] вследствие высокой скорости его перемещения и условий окружающей среды. Исключение субъективного фактора при контроле качества стеклодротов позволяет повысить его оперативность, ускорить технологический процесс производства, снизить выпуск бракованных изделий. Автоматизированная система непрерывного контроля качества стеклодротов должна обеспечивать периодическое получение кадров изображения, анализ и распознавание дефектов, определение их локации и формирование команды для резательной машины на отбраковку в процессе движения конвейера. Исходным моментом является процесс получения кадров изображения и формирование зоны визуального контроля [5,6]. Задача фор-

мирования зоны визуального контроля состоит в том, чтобы дальнейший анализ кадра проходил в области расположения стеклодрота, а не за его границами. Возможный подход к решению этой задачи описан в статье.

Особенности технологического процесса производства стеклодротов

Процесс горизонтального вытягивания стеклянных труб (толстостенных и тонкостенных) осуществляется с помощью тянульной машины [7]. Разогретая до 300°C стеклянная заготовка транспортируется по роликовому конвейеру до резательной машины, где она разрезается на отдельные трубки (дроты). Поскольку стеклянную трубу протягивают с помощью тянульной машины больше чем на 50 метров, она значительно вибрирует. Таким образом, особенности технологического процесса порождают ряд проблем.

Первой проблемой является сильная вибрация оборудования и заготовки (трубы) в процессе ее движения.

Другой проблемой является необходимость осмотра движущейся горячей стеклянной трубы со всех сторон. Поскольку возможность вращения объекта контроля на 360 градусов исключена, круговой осмотр трубы должен производиться с нескольких точек зрения (то есть более чем одной камерой). Полученные при этом изображения должны быть синхронизированы по времени для выявления дефектов и формирования команды на отбраковку.

Еще одной проблемой является высокая температура трубы, не позволяющая размещать оборудование в непосредственной близости от нее, а также высокая скорость движения по роликовому конвейеру. Эти факторы должны учитываться при выборе оборудования для системы машинного зрения и схемы его размещения, а также и при разработке архитектуры программного обеспечения для системы непрерывного контроля качества стеклодротов.

Таким образом, для того чтобы сформировать зону визуального контроля необходимо:

- устранить эффект вибрации оборудования и объекта контроля.
- разработать схему расположения обо-

рудования для кругового осмотра непрерывно движущейся горячей трубы.

- сформулировать требования к оптико-электронному оборудованию, с учетом температурного режима объекта контроля, скорости его движения и необходимой разрешающей способности.

Далее приводится описание тех решений, которые были приняты нами при разработке системы машинного зрения для непрерывного контроля качества стеклодротов.

Алгоритм формирования зоны визуального контроля в условиях вибрации

Вибрация оборудования тянульной машины и трубы приводит к тому, что зона контроля постоянно смещается относительно неподвижных камер в направлении, ортогональном направлению движения конвейера. Это является серьезным препятствием для выявления и распознавания дефектов. При фиксации изображения трубы отчетливо видны контуры ее границ, которые проявляются из-за того, что стенки трубы имеют определенную толщину. На рис. 1 показана схема расположения зоны контроля, в которую попадает труба вместе с ее границами. Также приведена гистограмма и основные ее характеристики, такие как минимальное и максимальное значения, среднее значение и стандартное отклонение. Наличие черного цвета в левой части гистограммы обусловлено включением границ трубы в зону контроля и является источником помех при проведении автоматизированного оптического контроля качества. Это является серьезным препятствием для выявления и распознавания дефектов. При фиксации изображения трубы отчетливо видны контуры ее границ, которые проявляются из-за того, что стенки трубы имеют определенную толщину. На рис. 2 показана оптимальная схема расположения зоны контроля, в которой отсутствуют изображения внешних и внутренних границ трубы, а также обозначена текущая система координат, определяемая направлением движения трубы и положением светочувствительной матрицы камеры.

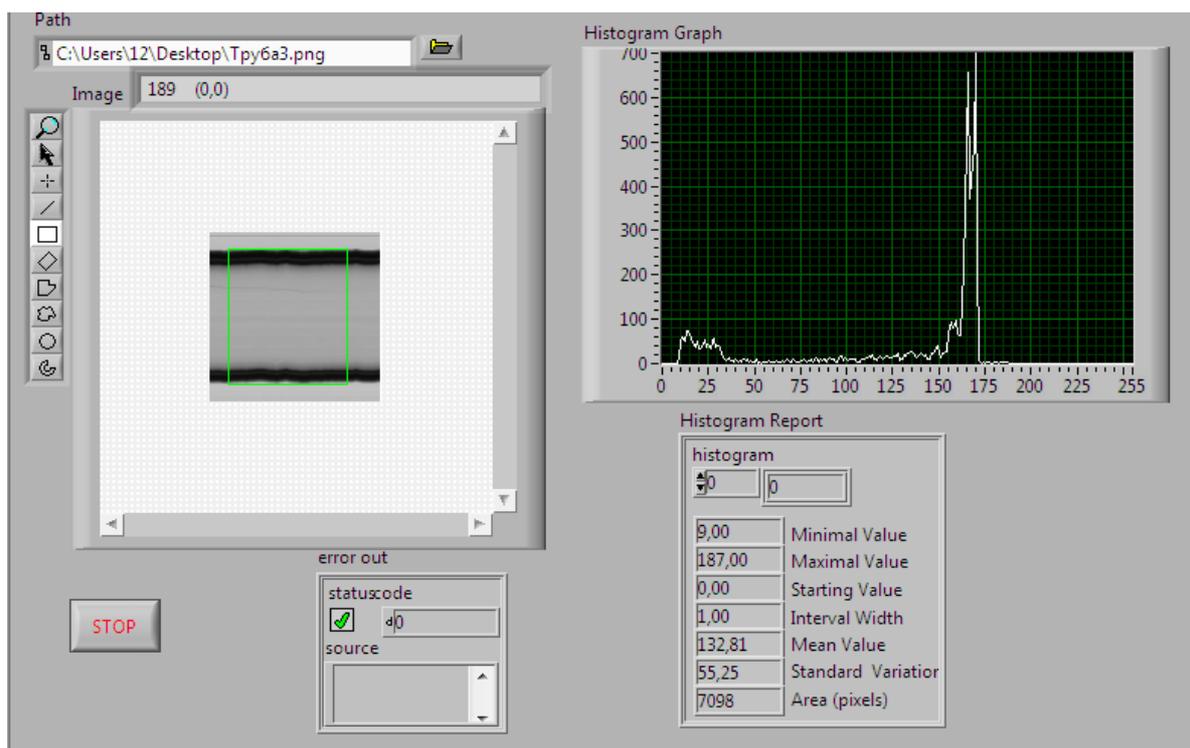


Рис. 1. Расположение зоны контроля с включением в нее границ трубы

Для того, чтобы устранить эффект вибрации тянульной машины, необходимо постоянно перемещать границы зоны визуального контроля относительно границ кадра в направле-

нии, ортогональном к направлению движения трубы. Положение зоны визуального контроля, при котором возможно уверенное детектирование дефектов, приведено на рис. 2.

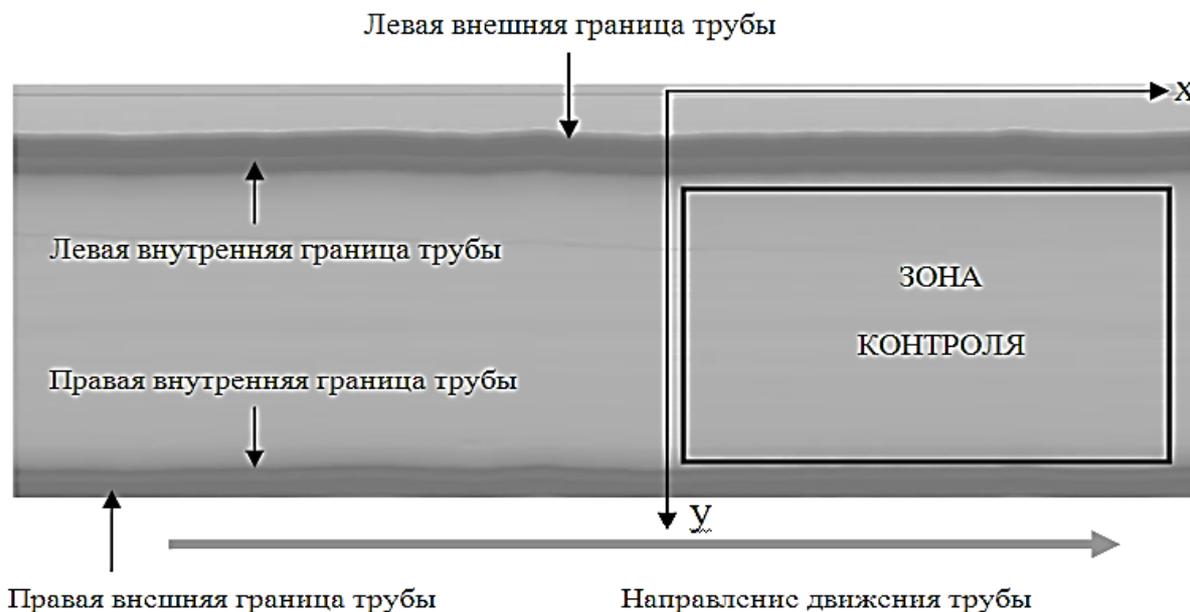


Рис. 2. Положение зоны контроля, обеспечивающее надежное детектирование дефектов

Гистограмма, соответствующая такому положению зоны контроля, приведена на рис. 3. Это типичная гистограмма в случае отсут-

ствия дефектов, и ее характеристики могут быть использованы для контроля положения зоны контроля.

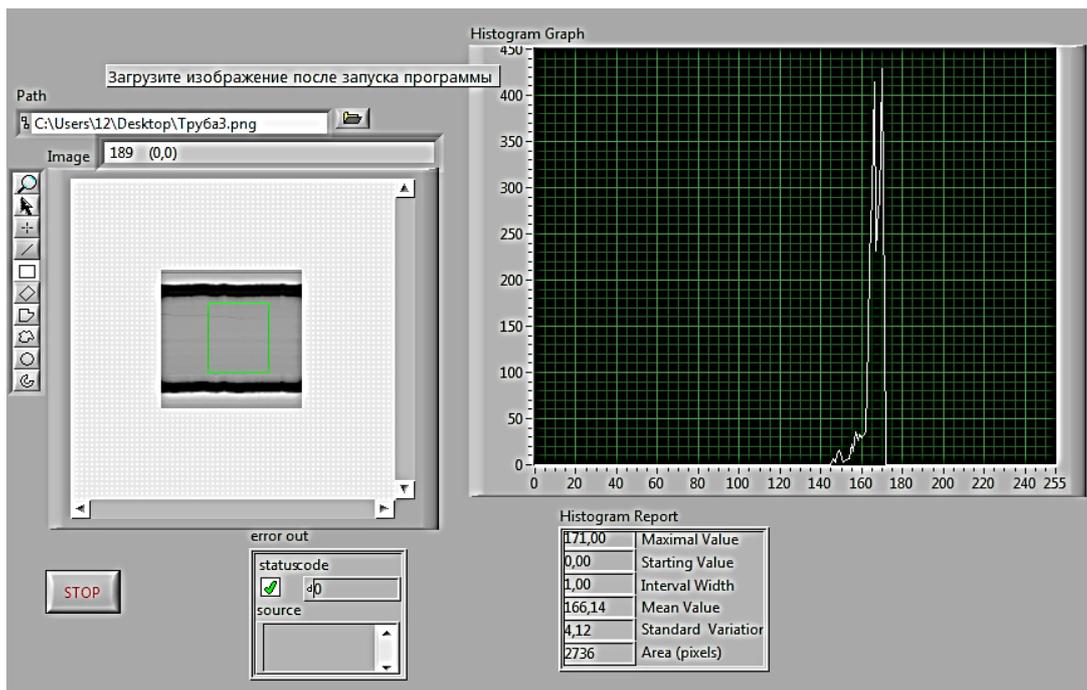


Рис. 3. Гистограмма изображения при правильном расположении зоны контроля и отсутствии дефекта

При выходе изображения за границы зоны контроля характер гистограммы существенно меняется, как это показано на рис. 4. В этом

случае резко меняется средняя яркость пикселей, а также стандартное отклонение яркости от среднего значения.

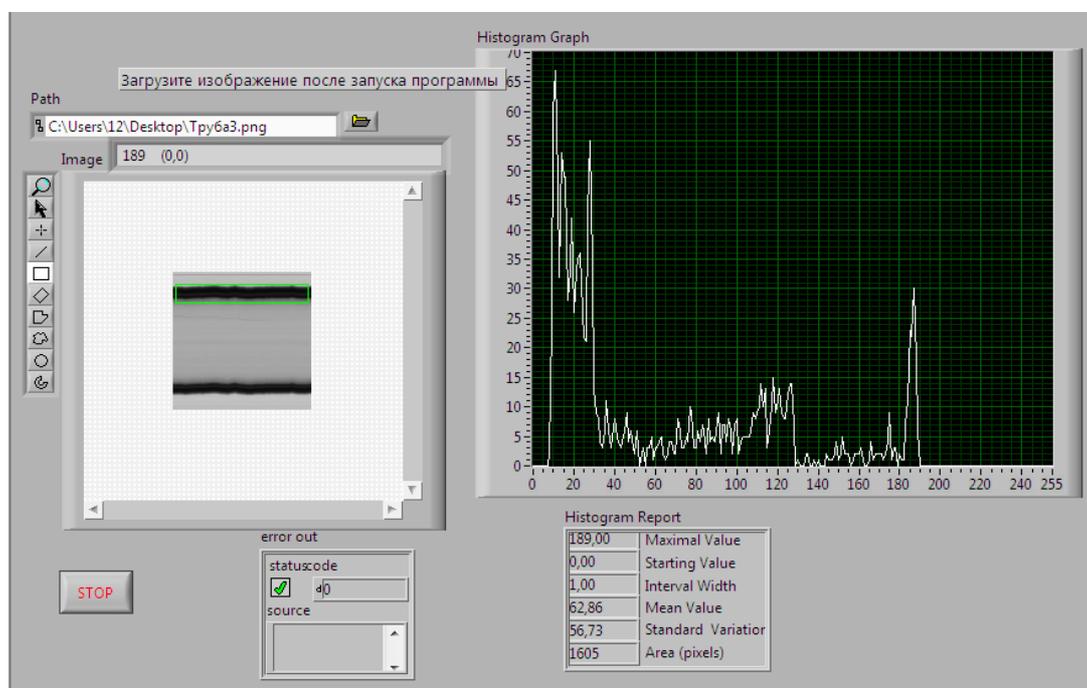


Рис. 4. Гистограмма изображения при расположении зоны контроля на границе трубы

Зону контроля необходимо удерживать таким образом, чтобы ее границы постоянно находились на минимальном удалении от правой внутренней и левой внутренней границ трубы. Для решения этой задачи был разрабо-

тан алгоритм, позволяющий определять правильное положение зоны контроля в процессе движения трубы.

На рис. 5 приведена блок-схема формирования зоны контроля в процессе движения тру-

бы для эффективного детектирования дефектов. Алгоритм автоматического поиска границ зоны контроля включает следующие шаги. Экспе-

риментально определяются усредненные значения яркости \bar{I} и стандартного отклонения \bar{s} на границе трубы (рис. 4).

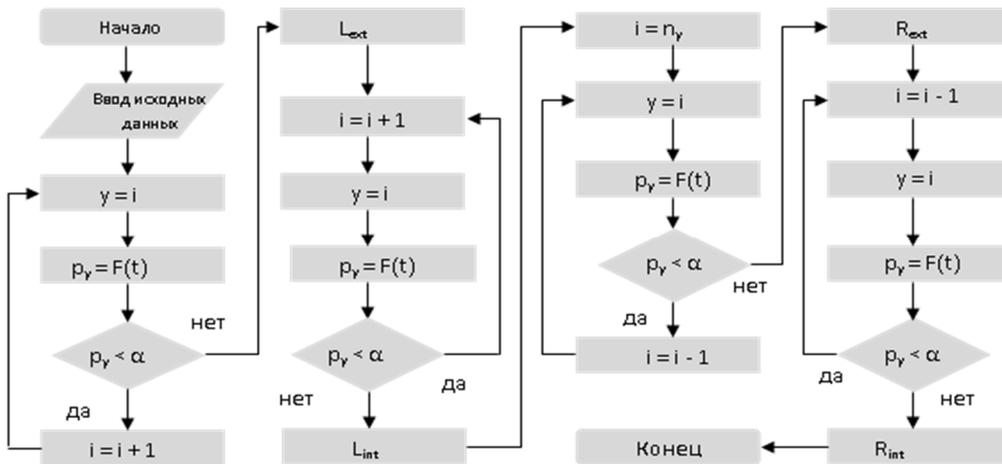


Рис. 5. Укрупненная блок-схема алгоритма формирования зоны контроля

Выбирается начальная точка изображения с координатами $x = 1, y = 1$ (рис. 5). Определяется конечная точка изображения с координатами $x = n_x, y = n_y$. Полагаем начальные значения вспомогательных переменных $i = 1, j = 1$.

После ввода значений матрицы яркостей изображения счетчик строк устанавливается в положение $i = 1$. Производится расчет среднего значения яркости первой строки:

$$\bar{I}(y) = \frac{1}{n_x} \sum_{j=1}^{n_x} I(y, x_j) \quad (1)$$

и дисперсии:

$$s_y^2 = \frac{1}{n_x - 1} \sum_{j=1}^{n_x} (I(y, x_j) - \bar{I}(y))^2 \quad (2)$$

Далее рассчитывается t -критерий Стьюдента:

$$t = (\bar{I} - \bar{I}(y)) / \sqrt{\frac{\bar{s}^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_x}} \quad (3)$$

и p -значение:

$$p_y = F(t), \quad (4)$$

если $\bar{I} - \bar{I}(y) < 0$ и p значение

$$p_y = 1 - F(t),$$

если $\bar{I} - \bar{I}(y) > 0$, где $F(t)$ - значение функции распределения Стьюдента. Задавая значение вероятности совершения ошибки первого рода α равно 0,05, получаем условие для проверки различия между усредненным значени-

ем яркости \bar{I} на границе трубы и текущим значением яркости для i -ой строки (рис. 5). Изменяя значения счетчика на $i = i + 1$, перемещаемся последовательно на один шаг по строкам матрицы до тех пор, пока не будет выполнено условие $p_y < \alpha$. Это означает, что найдена левая внешняя граница трубы на изображении - L_{ext} . Продолжаем движение по строкам матрицы до тех пор, пока перестанет выполняться условие $p_y < \alpha$. Это означает, что найдена левая внутренняя граница трубы на изображении - L_{int} . Далее счетчик строк устанавливается в конечное положение $i = n_y$ и проделываются те же самые шаги в направлении от конечной границы изображения к начальной, пока не будут найдены правая внешняя граница трубы на изображении - R_{ext} и правая внутренняя граница трубы на изображении - R_{int} . Разница между внешними границами

$$\Delta_{ext} = R_{ext} - L_{ext}$$

позволяет контролировать отклонение толщины трубы от нормативного значения, а разница между внешними и внутренними границами

$$\Delta_{Rei} = R_{ext} - R_{int}$$

и

$$\Delta_{Lei} = L_{ext} - L_{int}$$

позволяет контролировать отклонение толщины стенок трубы от нормативного значения. Вели-

чина

$$\Delta_{int} = R_{int} - L_{int}$$

определяет ширину зоны контроля в ортогональном направлении. Значения параметров Δ_{ext} , Δ_{Ret} , Δ_{Let} и Δ_{int} используются при формировании управляющих воздействий в процессе контроля качества стеклотротов. Использование описанного выше алгоритма позволяет непрерывно отслеживать зону визуального контроля при колебании трубы во время ее движения по конвейеру. Дальнейшая обработка полученного цифрового изображения заключается в поиске дефектов в зоне визуального контроля с использованием специально разработанных методов распознавания образов и формировании команд для резательной машины на отбраковку.

Схема непрерывного кругового осмотра объекта контроля

Расположение оборудования, камер и источников освещения определялось также с учетом теплового режима и вибрации объекта контроля. Оно было установлено между волоочильной машиной и резательной машиной, поскольку необходимо проверять непрерывно движущуюся стеклянную трубу, пока она еще не разрезана на отдельные дроты. Высокая температура не позволяет расположить камеры близко к трубе, поэтому был использован объектив с большим фокусным расстоянием, позволяющий проводить съемку на большом расстоянии. При большом увеличении снижается глубина резкости [8-10], которая определяется такими параметрами оптической системы, как главное фокусное расстояние, величина диафрагмы и дистанция фокусировки, и увеличивается абберрация объектива. Связь между главным фокусным расстоянием и диафрагмой при заданном расстоянии фокусировки определялась из соотношений

$$\begin{cases} (r_1 - r) f^2 - \beta \times d \times f \times r_1 + \beta \times r_1 \times r \times d = 0 \\ (r_2 - r) \times f^2 + \beta \times d \times f \times r_2 - \beta \times r_2 \times r \times d = 0 \end{cases}$$

где r - расстояния фокусировки, r_1 , r_2 - расстояния до передней и задней границ резкого изображения, f - главное фокусное расстояние, d - диафрагменное число, β - диаметр кружка нерезкости.

Глубина резкости, представляющая собой разницу между расстояниями до передней и задней границ резкого изображения $(r_1 - r_2)$,

определялась экспериментально в зависимости от диаметра проверяемой трубы. Величина увеличения выбиралась из условия оптимального соотношения между глубиной резкости и предельным разрешением. Расстояние r определялось экспериментально, исходя из технологического регламента.

Для решения задачи кругового осмотра горячей трубы была разработана многокамерная система. Эта система состоит из трех камер, расположенных вокруг трубы перпендикулярно к направлению ее движения так, как это показано на рис. 6. На рисунке символами S1, S2, S3 обозначены сенсоры камер, расположенных относительно трубы T так, что их оптические оси пересекаются друг с другом под углом 120 градусов. Система контроля качества включает три линейные камеры gaL8192 -80km и три светодиодные линейные осветительные системы. Для подключения камер был использован универсальный кабель с высокочастотным разъёмом для подключения скоростных видеокамер к фрейм-грабберам по протоколу Camera Link (C-Ln). Фрейм-грабберы обеспечивают захват изображения и формируют кадры.

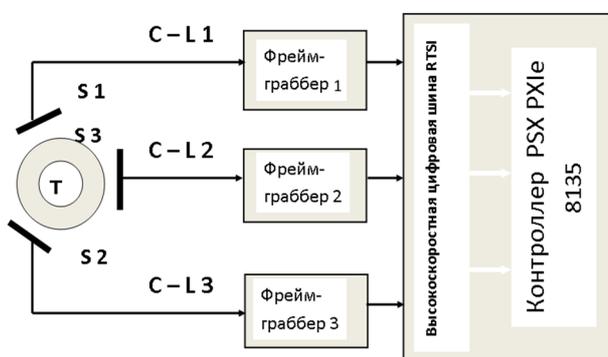


Рис. 6. Многокамерная система кругового осмотра объекта контроля

Стандартный кабель Camera Link передаёт сигналы управления видеокамерой, сигналы синхронизации видео и видеоданные, обеспечивая высокую скорость передачи данных – 850 Мбайт/с. Для интеграции различных устройств в единое был использован контроллер PSX PXIe 8135. Он установлен на четырехслотное шасси PXIe 1071 со специальной высокоскоростной цифровой шиной, предназначенной для коммутации устройств, с использованием низкоуровневой высокоскоростной связи в реальном времени. Устройства PXI являются специализированной платформой для систем измерения и автоматизации. Они совмещают возможности электрической шины PCI с мо-

дульной архитектурой и специализированными шинами синхронизации. Для координации управления движением, получения изображений и сбора данных используется специализированная шина RTSI. Это специальная высокоскоростная цифровая шина, предназначенная для интеграции систем с использованием низкоуровневой высокоскоростной связи в реальном времени между различными устройствами.

Обоснование выбора оптоэлектронных средств системы технического зрения

Среди всех дефектов, которые могут присутствовать в стеклянной трубе для фармацевтических контейнеров, самые трудные и наиболее критичные для поиска представлены воздушными пузырями. Воздушные пузыри самые небольшие дефекты, которые могут присутствовать. В печи и перед стержнем воздушные пузыри могут формироваться на стеклянных стенках. После того как труба протягивается с помощью тянущей машины, воздушные пузыри вытягиваются и они становятся длинными воздушными линиями. Считается допустимым [7], чтобы система машинного зрения выявляла дефекты с ортогональным сечением более 15 мкм и с продольным разрешением 0,5 мм. Следовательно, камера должна обладать высокой разрешающей способностью, поскольку должны быть идентифицированы очень малые дефекты.

Исходя из этих соображений, была выбрана линейная камера gaL8192 - 80km серии Basler gaseg, позволяющая построчно, строка за строкой, считывать данные изображения, обеспечивая проверку протяженных объектов. Используемую камеру отличает высокая частота линейной развертки – 80kHz. Это позволило, несмотря на высокую скорость движения трубы и ее вибрацию, получать изображения высокого качества. Камера имеет высокое разрешение – 8 к пикселей. Для нее соотношение «сигнал – шум» находится на уровне 43,3. Поэтому получаемые изображения отличались высоким качеством даже при низком уровне освещения, позволяя выявлять мельчайшие дефекты на стеклянной трубе. Хорошее качество изображения также определялось динамическим диапазоном камеры - соотношением между самым сильным и самым слабым сигналом изображения, который еще возможно отличить от шума. Высокая чувствительность и широкий динамический диапазон – 69,3 dB позволили выявлять дефекты даже при низком уровне их контрастности. Кроме того, динамический диапазон определил способность

камеры одновременно воспроизводить на изображении участки с очень высоким и очень низким уровнем освещенности. Контроль дефектов получился эффективным на высокой скорости съемки и при малых значениях выдержки даже при использовании недостаточно мощного осветительного оборудования. Это дало возможность получать четкие изображения с высоким уровнем детализации для эффективного выявления дефектов при низком уровне контрастности даже в условиях недостаточного освещения.

Заключение

Применение технологий машинного зрения в автоматизированной системе управления технологическими процессами позволяет повысить эффективность существующей подсистемы управления качеством, интегрированной в систему управления, для решения важнейшей проблемы производства – снижение потерь от брака и рекламаций. Разработанная методика автоматического формирования зоны визуального контроля является той основой, на которой осуществляется поиск дефектов, выделение их границ и отбраковка дефектных участков в автоматизированной подсистеме непрерывного контроля качества производства стеклотротов в режиме реального времени. Предложенная методика позволяет учесть специфические проблемы, определяемые производственным процессом, такие как сильная вибрация объекта контроля, необходимость его непрерывного кругового осмотра во время движения по конвейеру, температурный режим и требования к разрешающей способности оптико-электронного оборудования для получения изображений высокого качества. Рассмотренные в статье методы учета этих особенностей были опробованы экспериментально и подтвердили свою эффективность.

Литература

1. Рожков С.А., Бражник Д.А., Серов А.В. Проблемы автоматизированного контроля дефектов стеклоизделий // Проблемы региональной энергетики. 2006. №1. С. 37-48.
2. Reynolds G. and Paskiet D. Glass delamination and breakage, new answers for a growing problem // BioProcess International. 2011. № 9(11). P. 52-57.
3. Промышленная технология лекарств / В.И. Чуешев, С.Т. Зайцев и др. X.: МТК-Книга, 2002. 560с.
4. Оптические методы бесконтактных измерений линейных перемещений: монография / сост. А.А. Сарвин, А.А. Кульчицкий, А.К. Наумова. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2011. 195 с.
5. Kumar A. Computer-vision-based fabric defect detection: a survey // IEEE Trans. Industrial Electronics. 2008. №55.1. p. 348-363.

6. Садыков С.С., Стулов Н.Н. Методы и алгоритмы выделения признаков в системах технического зрения. М.: Горячая линия Телеком, 2005. 204 с.
7. Foglia P., Prete C., Zanda M. An inspection system for pharmaceutical glass tubes // WSEAS transaction on systems and control. 2015. V. 14. p. 123 – 128.
8. Келби С. Цифровая фотография, издательство. М.:

Диалектика, 2019. 288с.

9. Ищенко Е.П., Ищенко П.П., Зотчев В.А. Криминалистическая фотография и видеозапись: учеб.-практ. пособие / под ред. Е.П. Ищенко. М.: Юристъ, 1999. 436 с.

10. Яковлев Д.Ю. Специальные виды фотосъемки: метод. пособие. Иркутск: Издательство БГУЭП, 2015. 109 с.

Поступила 16.06.2020; принята к публикации 17.08.2020

Информация об авторах

Матвеев Юрий Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электронные вычислительные машины», Тверской государственной технической университет (170022, Россия, г. Тверь, проспект Ленина, 25), e-mail: matveev4700@mail.ru
Аль Окаби Мохаммед Мохаммед Али - аспирант кафедры «Электронные вычислительные машины», Тверской государственной технической университет (170022, Россия, г. Тверь, проспект Ленина, 25), e-mail: malaqab40@mail.ru

AUTOMATIC FORMATION OF A CONTROL ZONE WHEN CONTROLLING THE QUALITY OF THE PRODUCTION OF GLASSWORMS WITH THE USE OF TECHNICAL VISION

Yu.N. Matveev, M.M. Alaqabi

Tver State Technical University, Tver, Russia

Abstract: the article discusses the problems that arise when creating an automated system (AQMS) for continuous glassworm quality control based on optical technologies and methods of technical vision, as well as ways to solve them. The analysis process allowed us to identify specific features of production that should be considered at the stage of obtaining high-quality images of the test object for further processing, selection and identification of defects, determining their location and extent, generating the control actions to the feedback system. These include the high temperature of the object, its strong vibration at high speed along the roller conveyor, the need for a circular view of the workpiece during its movement. This paper describes the methodological provisions for the automatic formation of a visual control zone, taking into account technological limitations. The algorithm for forming a control zone on a digital image of an object in the conditions of its vibration is described. The layout of optoelectronic equipment for a circular view of a continuously moving hot pipe is developed. The requirements for optoelectronic equipment are justified, taking into account the temperature regime of the control object, its speed of movement and the necessary resolution

Key words: defect search, glassworms, quality control, digital images, optical technologies, technical vision

Reference

1. Rozhkov S.A., Brazhnic D.A., Serov A.V. “Problems of automated control of glassware defects”, *Problems of Regional Energy (Problemy regionalnoy energetiki)*, 2006, no.1, pp. 37-48.
2. Reynolds G., Paskiet D. “Glass delamination and breakage, new answers for a growing problem”, *BioProcess International*, 2011, no. 9(11), pp. 52-57.
3. Chueshev V.I. Zaytsev S.T. et al. “Industrial technology of drugs” (“Promishlennaya tekhnologiya lekarstv”), MTK-Kniga, 2002, 560 p.
4. Sarvin A.A., Kulchitsky A.A., Naumova A.K. “Optical methods of contactless measurements of linear displacements” (“Opticheskie metody beskontaktnykh izmereniy lineynykh peremeshcheniy”), monograph, St. Petersburg, SZTU, 2011, 195 p.
5. Kumar A. “Computer-vision-based fabric defect detection: a survey”, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2008, no. 55.1, pp. 348-363.
6. Sadykov S.S., Stulov N.N. “Methods and algorithms for feature extraction in technical vision systems” (“Metodi i algoritmy vydeleniya priznakov v sistemakh tekhnicheskogo zrenia”), Moscow, Goriachaia Liniya Telecom, 2005, 204 p.
7. Foglia P., Prete C., Zanda M. “An inspection system for pharmaceutical glass tubes”, *WSEAS Transaction on Systems and Control*, 2015, vol. 14, pp. 123-128
8. Kelby S. “Digital photography” (“Tsifrovye fotografii”), Moscow, Dialektika, 2019, 288p.
9. Ishchenko E.P., Ishchenko P.P., Zotchev V.A. “Forensic photography and video recording: study guide. manual” (“Kriminalisticheskaya fotografiya i videozapis’: ucheb.-pract. posobie”), Moscow, Yuristъ, 1999, 436 p.
10. Yakovlev D.Yu. “Special types of photography: manual” (“Spetsial'nye vidy fotos'yemki: metod. posobiye”), Irkutsk, BSUEP, 2015, 109 p.

Submitted 16.06.2020; revised 17.08.2020

Information about the authors

Yuriy N. Matveev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Tver State Technical University (25 Lenin avenue, Tver 17022, Russia), e-mail: matveev4700@mail.ru
Mohammed M. Ali Alaqabi, Graduate student, Tver State Technical University (25 Lenin avenue, Tver 17022, Russia), e-mail: malaqab40@mail.ru

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ****А.К. Муконин, В.А. Медведев, В.А. Трубецкой,
Д.А. Тонн, С.А. Горемыкин, Н.В. Ситников****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: системы автоматического управления (САУ) многих технологических процессов содержат частотно-регулируемые электроприводы (ЧРЭП). В ряде случаев для обеспечения непрерывности процессов предъявляются высокие требования к надежности элементов САУ, в том числе и ЧРЭП. Повысить надежность и расширить функциональные возможности ЧРЭП можно за счет применения универсального частотного преобразователя (УЧП). Рассматриваемый УЧП содержит трехфазный диодный мост (ТДМ), емкостной фильтр с последовательным соединением двух конденсаторов и инвертор напряжения (ИН) на основе шести транзисторных ключей. Питается УЧП в общем случае от трехфазной сети с нулевым проводом. Универсальность преобразователя обеспечивается соединением нейтрали сети с общей точкой емкостей фильтра. Преобразователь можно питать трехфазным напряжением 380 В или однофазным напряжением 220 В, сохраняя соединение обмотки двигателя в звезду. В случае однофазного питания выпрямитель преобразователя является удвоителем напряжения. При трехфазном питании УЧП обеспечивает повышение выходного напряжения по сравнению с классической схемой. Инвертор может работать как трехфазная мостовая схема или как схема со средним выводом. Последняя схема позволяет питать двигатель токами разной формы с сохранением равномерности вращения его магнитного поля. Серийно выпускаемые частотные преобразователи часто имеют фильтр с последовательным соединением конденсаторов. Такие преобразователи легко включить по схеме УЧП. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность привода с реконструированным частотным преобразователем. Повышение надежности САУ с ЧРЭП обеспечивается за счет сохранения работоспособности при обрыве двух любых проводов трехфазной четырехпроводной питающей сети

Ключевые слова: системы автоматического управления, преобразователь частоты, автономный инвертор напряжения, частотно-регулируемый электропривод

Введение

Системы автоматического управления (САУ) различными технологическими процессами содержат частотно-регулируемые электроприводы (ЧРЭП), изменением выходных механических величин которых осуществляется управление параметрами производственных установок.

В ряде случаев для обеспечения непрерывности процессов требуется высокая надежность элементов САУ, в том числе и электропривода. Повысить надежность и расширить функциональные возможности ЧРЭП можно за счет использования универсального преобразователя частоты (УПЧ).

Частотно-регулируемые электроприводы с трехфазными двигателями переменного тока в диапазоне малых и средних мощностей оснащают преобразователем частоты (ПЧ), который реализуется в виде структуры «Неуправляемый выпрямитель – автономный инвертор напряжения» (НВ-АИН) [1-3]. В данной струк-

туре выпрямитель обычно выполняется на основе диодного моста.

Среди классических ПЧ в зависимости от напряжения питания можно выделить два основных варианта.

В первом варианте диодный мост питается трехфазным напряжением 380-400 В, во втором - однофазным напряжением 220-230 В.

Во втором варианте из-за низкого уровня выходного напряжения АИН обмотку трехфазного двигателя соединяют по схеме «треугольник». Существенным недостатком данного способа соединения фаз двигателя является то, что в электрической машине при этом протекают токи нулевой последовательности.

Ниже рассматривается универсальный преобразователь, который позволяет реализовать не только классические схемы ПЧ, но и их нетрадиционные разновидности.

Применение нетрадиционных схем позволяет улучшить ряд характеристик электропривода, в частности обеспечить соединение обмотки двигателя в «звезду» как при трехфазном, так и однофазном напряжении питания.

Кроме того, применение УПЧ позволяет повысить надежность системы за счет сохране-

ния работоспособности при обрыве двух любых проводов трехфазной четырехпроводной сети.

Структура универсального преобразователя частоты

Множество разновидностей системы НВ-АИН обобщает схема на рис. 1, где выделены следующие элементы: НВ – неуправляемый выпрямитель; Ф1 – фильтр; БТ – блок торможения; АИН – автономный инвертор напряжения; М1 – электродвигатель. В общем случае преобразователь питается от трехфазной четырехпроводной сети.

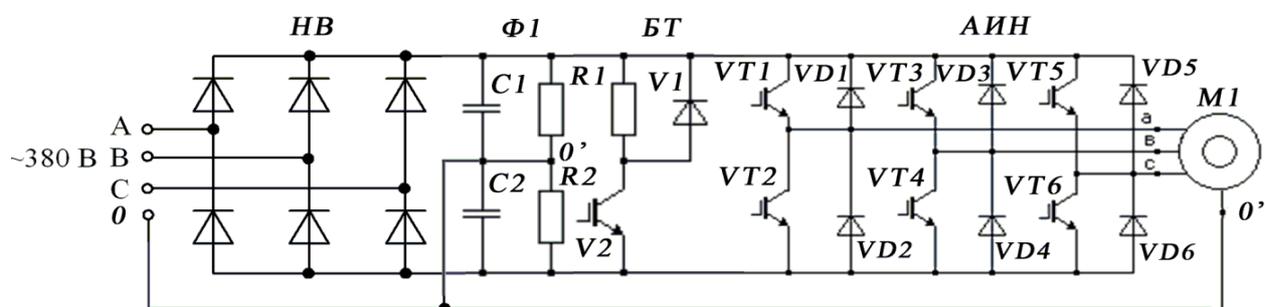


Рис. 1. Схема универсального преобразователя частоты

В этих ПЧ также используют трехфазные мостовой инвертор и диодный мост, но при этом в фильтре не применяют последовательное соединение конденсаторов. Трехфазную обмотку двигателя соединяют в треугольник. В случае однофазного питания напряжение подают на два любых входных вывода диодного моста.

Схема соединения трехфазной обмотки определяется максимальными величинами U_{\max} выходного напряжения преобразователя, которые зависят, в первую очередь, от входного напряжения инвертора U_d и от алгоритма коммутации вентилей инвертора. В частотных преобразователях применяются два основных способа коммутации транзисторных ключей АИН – «векторная» широтно-импульсная модуляция (ШИМ) и «симметричная» [1]. Рассматриваемые способы коммутации реализуют алгоритмы, создающие на выходе ПЧ трехфазные напряжения, которые обладают основными гармоническими составляющими, изменяющимися по синусоидальным законам.

Для преобразователя с симметричной ШИМ справедливо соотношение:

$$U_{E \max} \approx 0,614 U_d. \quad (1)$$

В распространенных схемах ПЧ, питающихся трехфазным напряжением 380-400 В, отсутствует связь общей точки конденсаторов фильтра Ф1 с нейтралью сети, а обмотка двигателя М1 соединена в звезду без нулевого провода. В таком варианте АИН и выпрямитель функционируют как трехфазные мосты. Так как выходное напряжение выпрямителя превышает 500 В, конденсаторы фильтра соединяют последовательно. Резисторы R1, R2 обеспечивают выравнивание напряжения на конденсаторах.

Ряд частотных преобразователей спроектирован для питания либо от трехфазной сети с линейными напряжениями 220-230 В, либо от источника однофазного напряжения уровня 220-230В.

В случае использования векторной ШИМ справедлива следующая формула:

$$U_{E \max} \approx 0,707 U_d. \quad (2)$$

В случае соединения трёхфазной обмотки по схеме «звезда» номинальные линейные напряжения должны составлять 380-400 В, а при соединении по схеме «треугольник» – 220-230 В.

В табл. 1 указаны значения напряжения U_d , которые используются для формирования фазных напряжений двигателя 220 В при различных способах коммутации транзисторов. Значения напряжений получены с учетом формул (1),(2).

Напряжения U_d , близкие к 537 В, обеспечиваются в традиционном преобразователе при питании от трехфазного напряжения 380 В. В таком случае обмотку двигателя соединяют в звезду. В преобразователях частоты с однофазным напряжением питания 220 В величина U_d близка к 300 В, соответственно выходное напряжение АИН не более 220 В, следовательно, трехфазную обмотку двигателя нужно соединять в треугольник.

Таблица 1

Соотношения между входными и выходными напряжениями ПЧ

Тип ШИМ	$U_{e \max}$, В	U_d , В
Симметричная	380	622
	220	360
Векторная	380	537
	220	311

Функциональные возможности преобразователя частоты можно существенно расширить, включив в схему питания общую точку конденсаторов фильтра. За счет этого получим универсальный преобразователь (УПЧ), представленный на рис. 1. Классические схемы ПЧ можно рассматривать как частные случаи УПЧ.

Частным случаем УПЧ является схема, в которой преобразователь питается от трехфазной четырехпроводной сети, а обмотка двигателя соединяется в звезду без нулевого провода. При этом с нулем сети соединена общая точка конденсаторов фильтра. В таком ПЧ выпрямитель является, фактически, последовательным соединением двух трехфазных нулевых выпрямителей. Данную схему ЗПН можно назвать сдвоенным трехфазным нулевым выпрямителем (СТНВ) [4]. Применение СТНВ обеспечивает увеличение выходного напряжения ПЧ по сравнению с классической схемой. Это позволяет расширить диапазон частот электропривода. Использование СТНВ в преобразователях частоты предложено в [5]. Следует различать СТНВ, имеющий два выходных вывода, и известный трехфазный нулевой выпрямитель со средней точкой, у которого три выходных клеммы.

Анализ работы преобразователей, которые являются частными случаями УПЧ, проводился, в частности, с помощью моделирования в системе MATLAB. Ввиду громоздкости используемые модели в настоящей статье не приводятся. Варианты моделей и результаты моделирования и исследования приводов с рассматриваемыми ПЧ можно найти в [4-14]. В [8] приведены результаты моделирования преобразователя с СТНВ и классического ПЧ. Параметры используемых моделей: трехфазный генератор синусоидальных ЭДС с фазным напряжением 220 В содержит фазную индуктивность 200 мкГн и обладает активным сопротивлением фазы равным 0,1 Ом; мощность, которая потребляется от ЗПН, составляет 175 Вт; конденсаторы С1, С2 (см. рис. 1) имеют одинаковую емкость, равную 65 мкФ. Ряд ключевых параметров сравниваемых схем приведен ниже в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования ПЧ с трехфазным питанием

Схема выпрямителя	U_d , В	$U_{e \max}$, В	I_m , А	I_a , А
СТНВ	600	424	3,7	0,75
Трехфазный мостовой	533	377	2,3	0,62

В табл. 2 приняты следующие обозначения: U_d – средняя величина выпрямленного напряжения; I_m и I_d – амплитудное и действующее значения сетевого тока. Величина $U_{e \max}$ рассчитывалась по формуле (2).

Данные табл. 2 показывают, что использование СТНВ дает возможность поднять напряжение на выходе ПЧ на величину примерно в 11%. Использование преобразователя с СТНВ обладает существенным недостатком, который выражается в негативном влиянии на питающую его сеть.

Если отключать нулевой провод при частотах двигателя ниже номинальной, этот недостаток во многом устраняется.

Если ПЧ, показанный на рис. 1, подключить к однофазной сети с напряжением 220 В, подав питание на две любые входные клеммы трехфазного моста, то выпрямитель будет работать как диодный однофазный мост. Если однофазное напряжение в 220 В подать на нулевую клемму 0 и любой из выводов А, В, С, то тогда рассматриваемый выпрямитель станет функционировать как удвоитель напряжения. Применять удвоитель напряжения в ПЧ предлагается в [10].

Некоторые приемы, способы и сведения о возможности построения и применения модели классического однофазного ПЧ и ПЧ, содержащего удвоитель напряжения (ПЧ УН), приведены в [8].

В этом случае мощность, которая потребляется от звена постоянного напряжения (ЗПН), принимается равной 175 Вт. В ПЧ классического типа емкость фильтра достигала 170 мкФ, а любой из конденсаторов в ПЧ УН имел емкость, равную 85 мкФ. Зная заданный размах пульсаций напряжения на выходе ЗПН, который составлял $K_{пу}=0,05$, выберем значения емкостей. Соотношение $K_{пу} = (U_{\max} - U_{\min})/2U_d$, где под величинами напряжений U_{\max} и U_{\min} подразумевались максимальное и минимальное напряжения на выходе фильтра, использовалось для определения величины $K_{пу}$.

Часть результатов моделирования сведена в табл. 3.

Анализ результатов моделирования, приведенных в табл. 3, показывает, что достижимые выходные напряжения больше при однофазном питании в ПЧ УН по сравнению с классическим ПЧ, питаемым трехфазным входным напряжением 380 В. Достижимая величина выходных напряжений ПЧ УН дает возможность соединять трехфазную обмотку двигателя по схеме «звезда».

Необходимо обратить внимание на то, что воздействие на сеть питания ПЧ УН, что показано в табл. 3, является менее негативным, чем у классического преобразователя с мостовым однофазным выпрямителем.

Таблица 3
Результаты моделирования ПЧ с однофазным питанием

Выпрямитель	U_d , В	$U_{e\max}$, В	I_a , А	I_m , А
Однофазный мост	294	208	1,7	7,0
Удвоитель напряжения	552	390	1,5	5,35

Приводы с несинусоидальными фазными токами двигателя

Преобразователь частоты с трехфазным нулевым АИН в случае, если обмотка двигателя имеет соединение по схеме «звезда с нулевым проводом», представляет собой частный случай схемы, приведенной на рис. 1. При этом нейтральный провод присоединяют к нулевому выводу схемы.

По функциональным возможностям трехфазный нулевой АИН существенно выигрывает, если его сравнивать с трехфазным мостовым.

Для доказательства данного постулата приведем тезис о том, что мостовые трехфазные инверторы классического типа генерируют в трехфазной обмотке токи с основными гармоническими составляющими, образующими трехфазную синусоидальную систему, а высокочастотные пульсации этих токов малы.

Для создания равномерно вращающегося магнитного поля (КРВП) в электродвигателе необходимо его питание осуществлять синусоидальными токами. Известно, что КРВП создается и при других по форме токах в фазах трехфазного двигателя.

Целый спектр технических характеристик электропривода можно значительно улучшить, применяя несинусоидальные токи, что показано в ряде научных работ и авторских свидетельств [15-24].

В отличие от трехфазного мостового инвертора трехфазный нулевой АИН дает возможность подавать в трехфазную обмотку токи различных форм.

Множество форм фазных токов i_1-i_3 трехфазного двигателя, обеспечивающих КРВП, можно представить в виде суммы нулевой составляющей i_0 и синусоидальных составляющих:

$$i_i = I_s \cos(\omega t - (i-1) \frac{2\pi}{3}) + i_0 = , \quad (3)$$

$$= I_s \cos(\alpha - (i-1) \frac{2\pi}{3}) + i_0$$

где $i = 1, 2, 3$, а I_s, ω – постоянные величины (константы).

Очевидно, что нулевая составляющая токов i_0 протекает в трех фазах двигателя, следовательно, она индуцирует три вектора фазных МДС, которые одинаковы по модулю и сдвинуты друг относительно друга на угол 120° . Естественно, что векторная сумма МДС равна нулю. Следовательно, нулевая составляющая токов i_0 не оказывает влияния на электромагнитный момент.

Электроприводы, у которых существует канал, позволяющий формировать i_0 , принято называть приводами с управляемой нулевой составляющей тока (ПУНСТ) [4].

Очевидно, что классические частотные электроприводы с токами, изменяющимися по синусоидальным законам, можно рассматривать как частный случай ПУНСТ.

В электроприводах с транзисторными АИН рекомендуется использовать следующие формы токов: синусоидальную, которая минимизирует действующие значения токов (рис. 2, а); и квазитрапецеидальную, которая минимизирует амплитуду токов (рис. 2, б) [4].

Любой из токов $i_1 - i_3$ в интервалах, длящихся $\pi/3$, имеет значение $\pm \sqrt{3}I_s / 2$, в этом выражении I_s представляет собой амплитуду синусоидальной составляющей i_{C1} для нулевой составляющей тока. Нулевая составляющая тока i_0 (рис. 2, а) на интервале, к примеру, от 0 до $\pi/6$ определяется следующим выражением $i_0 = I_s(-\cos \alpha + \sqrt{3} / 2)$.

Амплитудные значения токов квазитрапецеидальной формы на 15,4% меньше амплитудного значения синусоидальной составляющей I_s . Действующие значения токов синусоидальной формы определяются следующим выражением $I_{DC} = I_s / \sqrt{2} \approx 0,707I_s$, в этом случае действующие значения квазитрапецеидальных по форме токов определяются выражением

$I_{дт} = I_S \sqrt{(7\pi - 9\sqrt{3})/4\pi} \approx 0,7138I_S$. Анализ данных выражений показывает, что значение $I_{дт}$ всего на 0,9% больше чем $I_{дс}$.

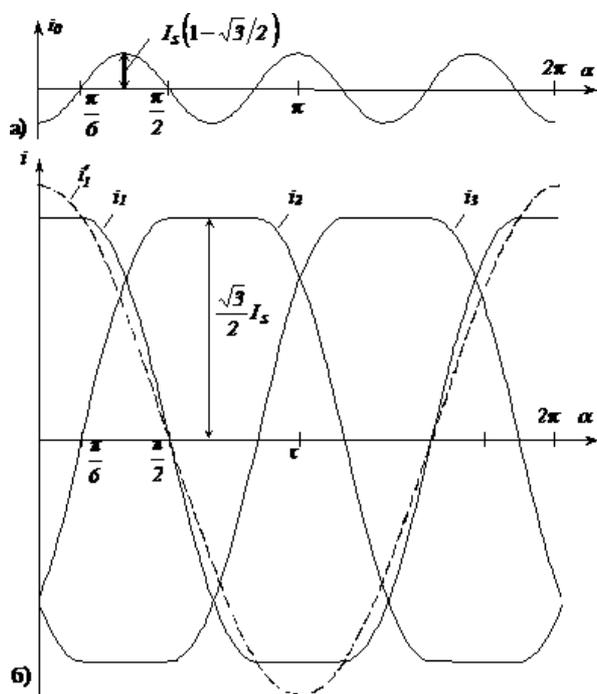


Рис. 2. Зависимости токов синусоидальной (а) и квазитрапецеидальной (б) форм

Если асинхронные двигатели серии 4А питать квазитрапецеидальными токами, а не синусоидальными токами, то, если считать от величины номинальной потребляемой мощности, потери возрастают только на (0,1-0,3) % [24].

В этом случае происходит существенное уменьшение амплитуды токов, что выступает в качестве положительного момента как для электродвигателя, так и для преобразователя частоты. К примеру, в случае квазитрапецеидальных по форме токах амплитудное значение мощностей мгновенных потерь в фазных обмотках электродвигателя на 33% меньше этой же величины при синусоидальных токах. Наиболее ярко на малых частотах токов проявляется эффект уменьшения величины амплитудного значения мощности потерь, что положительно влияет на состояние изоляции обмоток.

Используя двухфазный нулевой АИН, в котором содержится на одну треть меньше транзисторных ключей, чем в трехфазных мостовых и нулевых инверторах, можно получить трехфазную систему синусоидальных напряжений [4].

Если подключить в АИН, показанном на рис. 1, одну из стоек и оставив выводы,

например, такие как а, в и 0, то можно получить двухфазный нулевой АИН. Обмотку трехфазного электродвигателя, соединенную по схеме «треугольник» или по схеме «звезда», можно подключить к этим выводам.

На рис. 1 показана схема электропривода, которая остается в работоспособном состоянии даже в аварийном режиме сети, который заключается в обрыве любых двух проводов, что позволяет применять её при эксплуатации ответственных объектов.

На базе серийно выпускаемых ПЧ с трехфазным питанием 380 В можно реализовать универсальный преобразователь, для чего нужно общую точку конденсаторов фильтра соединить с нулем сети. Данная схема была экспериментально проверена в электроприводе фирмы ABB ACS355-03x-08-A8-4 и в приводе MICROMASTER 440-6SE6440-2UD13-7AA1XAW623-00053. Эксперимент подтвердил работоспособность схемы.

К достоинствам применения УПЧ в САУ с ЧРЭП следует отнести сохранение работоспособности системы при обрыве двух любых проводов трехфазной четырехпроводной сети.

Основные выводы

1. Системы автоматического управления различных технологических процессов содержат частотно-регулируемые электроприводы. В ряде случаев для обеспечения непрерывности процессов предъявляются высокие требования к надежности элементов САУ, в том числе электроприводов. Повысить надежность и расширить функциональные возможности частотного привода можно за счет использования универсального преобразователя частоты.

2. Универсальный ПЧ содержит в своем составе фильтр, состоящий из последовательно соединенных конденсаторов. При соединении с нейтралью сети питания общей точки конденсаторного фильтра обеспечивается многофункциональность преобразователя. При этом преобразователь может получать электроэнергию от трехфазных сетей с напряжением 380-400 В и от однофазных сетей с напряжением 220-230 В.

3. В приводе с классическим ПЧ, питающимся однофазным напряжением 220-230 В, из-за низкого уровня напряжения трехфазную обмотку соединяют по схеме «треугольник». Существенным недостатком такой схемы соединения обмоток является то, что в этом случае в них возникают токи нулевой последовательности. При питании универсального ПЧ однофазным напряжением обмотку двигателя

можно соединять в звезду, так как уровень выходных напряжений преобразователя даже выше, чем в схеме с трехфазным напряжением питания 380-400 В.

4. При питании преобразователя от трехфазной четырехпроводной сети звено постоянного напряжения является сдвоенным трехфазным нулевым выпрямителем, что повышает напряжение двигателя и расширяет диапазон скоростей привода.

5. Частным вариантом преобразователя является схема с трехфазным нулевым инвертором, который даёт возможность получать в трехфазной обмотке токи различной формы при равномерно вращающемся магнитном поле.

6. Для электроприводов с транзисторными ПЧ рекомендуется использовать следующие формы токов: квазитрапецеидальную, которая минимизирует амплитуду токов, и синусоидальную.

7. Универсальный ПЧ можно реализовать на основе серийных преобразователей, содержащих фильтр с последовательно соединенными конденсаторами. Экспериментальные исследования подтвердили указанную возможность.

8. Повышение надежности привода с универсальным преобразователем частоты обеспечивается за счет сохранения работоспособности при обрыве двух любых проводов трехфазной четырехпроводной питающей сети.

Литература

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Издательский центр "Академия", 2006. 272 с.
2. ACS355: user's manual. URL: https://library.e.abb.com/public/1563267283574059bd87947c8b1368aa/EN_ACS355_UM_D.pdf (дата обращения 28.12.2017).
3. MICROMASTER 440: Betriebsanleitung. URL: https://siemens-drives.ru/files/lists/s_Directories/69_Files_1351254988_440_opi_24294529_ru_1006.pdf (дата обращения 6.10.2006).
4. Муконин А.К., Шиянов А.И. Частотные приводы с токовым управлением. Воронеж: ВГТУ, 2006. 142 с.
5. Муконин А.К. О расширении диапазона регулирования скорости частотного электропривода // Анализ и проектирование средств роботизации и автоматизации: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2003. С. 26.
6. Муконин А.К. Универсальный преобразователь частоты для трехфазных и двухфазных двигателей // Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы регион. науч.-техн. конф. Воронеж, 2001. С. 147-149.
7. Муконин А.К., Пресняков Г.Е. Моделирование работы удвоителя напряжения // Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы регион. науч.-техн. конф. Воронеж, 2005. С. 59-61.

8. Муконин А.К., Богомазов А.Е. О совершенствовании характеристик частотного электропривода // Электротехнические комплексы и системы управления. 2015. №3. С. 43-49.

9. Беляков В.О., Перцев А.Ю., Муконин А.К. О повышении надежности и совершенствовании характеристик частотного привода // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники: тр. Всерос. студ. науч.-техн. конф. Воронеж, 2019. С. 181-185.

10. Муконин А.К. Схемы преобразователей частотного электропривода при питании от однофазного напряжения // Автоматизация и роботизация технологических процессов: материалы регион. науч.-техн. конф. Воронеж, 2005. С. 58-59.

11. Давыдов Е.С., Глумов А.Г., Муконин А.К. Расширение функциональных возможностей и повышение надежности частотного электропривода // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники: тр. Всерос. студ. науч.-техн. конф. Воронеж, 2017. С. 197-198.

12. Муконин А.К., Глумов А.Г., Давыдов Е.С. Универсальный частотный преобразователь для электропривода // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: тр. Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2017. С. 83-87.

13. Муконин А.К. Универсальный преобразователь частоты для электропривода // Современные технологии в науке и образовании: сб. тр. II Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. В 8 тт. Рязань, 2017. С. 124-127.

14. Глумов А.Г., Давыдов Е.С., Муконин А.К. Исследование звена постоянного тока с удвоителем напряжения // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники: тр. Всерос. студ. науч.-техн. конф. Воронеж, 2017. С. 186-187.

15. А.С. № 1067584. СССР/ Муконин А.К. Электропривод с частотно-токовым управлением. 1984. Бюл. № 2.

16. А.С. № 700930 СССР/ Зайцев А.И., Муконин А.К., Шиянов А.И., Юрьев Н.Я. Способ управления вентиляльным электродвигателем с трехсекционной обмоткой якоря. 1979. Бюл. № 44.

17. А.С. № 909782 СССР /Зайцев А.И., Муконин А.К., Шиянов А.И. Электропривод с частотно-токовым управлением. 1982. Бюл. № 8.

18. А.С. №1403326 СССР/ Муконин А.К., Пенской Н.И., Трубецкой В.А. Электропривод. 1988. Бюл. № 22.

19. А.С. №1026274 СССР /Муконин А.К., Пенской Н.И., Харченко А.П., Шиянов А.И. Трехфазный источник сигналов для регулируемого электропривода. 1983. Бюл. № 24.

20. А.С. №680115 СССР /Зайцев А.И., Шиянов А.И., Муконин А.К., Юрьев Н.Я. Способ управления вентиляльным двигателем с трехсекционной обмоткой якоря. 1979. Бюл. № 30.

21. Муконин А.К., Шиянов А.И. Частотно-токовый электропривод с управляемой нулевой составляющей тока // Известия вузов. Электромеханика. 1990. № 4. С. 84-89.

22. Шиянов А.И., Герасимов М.И., Муравьев И.В. Системы управления перегрузочных манипуляторов АЭС с ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 1987. 176 с.

23. Муконин А.К., Шиянов А.И., Кочегаров М.В. Частотный электропривод с квазитрапецеидальной формой токов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2008. Т. 4. № 4. С. 8-11.

24. Муконин А.К., Кочегаров М.В. Энергетические соотношения в частотном приводе с квазитрапецеидальной формой токов // Вычислительные машины, автоматика и робототехника: материалы науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. Воронеж, 2008. С. 34-39.

Информация об авторах

Муконин Александр Константинович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: mukonin_ak@mail.ru, тел. 8(473)243-77-20

Медведев Владимир Алексеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: va.medved60@yandex.ru, тел. 8(473)243-77-20

Трубецкой Виктор Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: viktortrubetskoi@yandex.ru, тел. 8(473)243-77-20

Тонн Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tonnda@mail.ru, тел. 8(473)243-77-20

Горемыкин Сергей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: gogemykinsa@yandex.ru, тел. 8(473)243-77-12

Ситников Николай Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nvs17939@mail.ru, тел. 8(473)243-77-12

**IMPROVING THE RELIABILITY OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS
FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES**

**A.K. Mukonin, V.A. Medvedev, V.A. Trubetskoy,
D.A. Tonn, S.A. Goremykin, N.V. Sitnikov**

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: automatic control systems (ACS) of many technological processes contain frequency-controlled electric drives (FCED). In some cases, to ensure the continuity of the process, high demands are placed on the reliability of the ACS elements, including the variable frequency drive. It is possible to increase reliability and expand the functionality of the variable frequency drive through the use of a universal frequency converter (UFC). The considered UFC includes a three-phase diode bridge (TPDB), a capacitive filter with a series connection of two capacitors and a voltage inverter (VI) based on six transistor switches. The UFC is fed, in general, from a three-phase network with a zero wire. The versatility of the converter is ensured by connecting the neutral of the network to a common point of filter capacities. The converter can be powered by a three-phase voltage of 380 V or a single-phase voltage of 220 V, while maintaining the connection of the motor winding to the star. In the case of single-phase power, the converter rectifier is a voltage doubler. With three-phase power supply, the UFC provides an increase in the output voltage compared to the classical circuit. The inverter can operate as a three-phase bridge circuit or as a circuit with an average output. The latter scheme allows you to power the motor with currents of various shapes while maintaining uniform rotation of its magnetic field. Commercially available frequency converters often have a series capacitor filter. Such converters are easy to turn on according to the UFC scheme. Experimental studies have confirmed the operability of a drive with a reconstructed frequency converter. Improving the reliability of self-propelled guns with variable frequency drive is ensured by maintaining operability when any two wires of a three-phase four-wire supply network break

Key words: automatic control systems, frequency converter, autonomous voltage inverter, variable frequency drive

References

1. Sokolovskiy G.G. "AC electric drives with frequency control" ("Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem"), Moscow, Publishing Center "Academiya", 2006, 272 p.
2. ACS355: user's manual, available at: https://library.e.abb.com/public/1563267283574059bd87947c8b1368aa/EN_ACS355_UM_D.pdf (date of access 12.28.2017).
3. MICROMASTER 440: Betriebsanleitung, available at: https://siemens-drives.ru/files/lists/s_Directories/69_Files_1351254988_440_opi_24294529_en_1006.pdf (date of access October 6, 2006).
4. Mukonin A.K., Shiyarov A.I. "Frequency drives with current control" ("Chastotnye privody s tokovym upravleniem"), VSTU, 2006, 142 p.
5. Mukonin A.K. "On expanding the range of regulation of the speed of a frequency electric drive", *Analysis and Design of Robotics and Automation: Coll. of Scientific Papers (Analiz i proektirovaniye sredstv robotizatsii i avtomatizatsii: sb. nauch. tr.)*, Voronezh, VSTU, 2003, p. 26.
6. Mukonin A.K. "Universal frequency converter for three-phase and two-phase motors", *Automation and Robotization of Technological Processes: Proc. of Regional Scientific-Tech. Conf. (Avtomatizatsiya i robotizatsiya tekhnologicheskikh protsessov: materialy region. nauch.-tekhn. konf.)*, Voronezh, 2001, pp. 147-149.
7. Mukonin A.K., Presnyakov G.E. "Modeling the work of a voltage doubler", *Automation and Robotization of Technological Processes: Proc. of the Regional Scientific-Tech. Conf. (Avtomatizatsiya i robotizatsiya tekhnologicheskikh protsessov: materialy region. nauch.-tekhn. konf.)*, Voronezh, 2005, pp. 59-61.

8. Mukonin A.K., Bogomazov A.E. "On improving the characteristics of a frequency electric drive", *Electrotechnical Complexes and Control Systems: Scientific-Technical Journal (Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya)*, Voronezh, VSTU, 2015, no. 3, pp. 43-49.
9. Belyakov V.O., Pertsev A.Yu., Mukonin A.K. "On improving the reliability and improving the characteristics of the frequency drive", *Applied Problems of Electromechanics, Energy, Electronics: Proceedings of the All-Russian Student Scientific-Technical. Conf. (Prikladnye zadachi elektromekhaniki, energetiki, elektroniki: tr. Vseros. stud. nauch.-tekhn. konf.)*, Voronezh, 2019, pp. 181-185.
10. Mukonin A.K. "Schemes of converters of a frequency electric drive powered by a single-phase voltage", *Automation and Robotization of Technological Processes: Proc. of the Regional Scientific-Tech. Conf. (Avtomatizatsiya i robotizatsiya tekhnologicheskikh protsessov: materialy region. nauch.- tekhn. konf.)*, Voronezh, 2005, pp. 58-59.
11. Davydov E.S., Glumov A.G., Mukonin A.K. "Extending the functionality and increasing the reliability of the frequency electric drive", *Applied Problems of Electromechanics, Energy, Electronics: Proceedings of the All-Russian Student Scientific-Technical. Conf. (Prikladnye zadachi elektromekhaniki, energetiki, elektroniki: tr. Vseros. stud. nauch.-tekhn. konf.)*, Voronezh, 2017, pp. 197-198.
12. Mukonin A.K., Glumov A.G., Davydov E.S. "Universal frequency converter for electric drive", *New Technologies in Scientific Research, Design, Management, Production: Proceedings of the International Scientific and Technical. Conf. (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovaniy, upravlenii, proizvodstve: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, Voronezh, 2017, pp. 83-87.
13. Mukonin A.K. "Universal frequency converter for electric drive", *Modern Technologies in Science and Education - STNO-2017: Collection of Works of the II International Scientific and Technical Conf. (Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii - STNO-2017: sb. tr. II Mezhdunar. nauch.-tekhn. i nauch.-metod. konf.)*, Ryazan, 2017, pp. 124-127.
14. Glumov A.G., Davydov E.S., Mukonin A.K. "Study of a DC link with a voltage doubler", *Applied Problems of Electromechanics, Energy, Electronics: Proceedings of the All-Russian Student Scientific-Technical. Conf. (Prikladnye zadachi elektromekhaniki, energetiki, elektroniki: tr. Vseros. stud. nauch.-tekhn. konf.)*, Voronezh, 2017, pp. 186-187.
15. Mukonin A.K. "Electric drive with frequency-current control" ("Elektroprivod s chastotno-tokovym upravleniem"), author's certificate, no. 1067584 USSR, 1984, bull. no. 2.
16. Zaitsev A.I., Mukonin A.K., Shiyarov A.I., Yuryev N.Ya. "The method of controlling a valve motor with a three-section winding of the armature" ("Sposob upravleniya ventil'nym elektrodvigatelem s trekhseksionnoy obmotkoy yakorya"), author's certificate, no. 700930 USSR, 1979, bull. no. 44.
17. Zaitsev A.I., Mukonin A.K., Shiyarov A.I. "Electric drive with frequency-current control" ("Elektroprivod s chastotno-tokovym upravleniem"), author's certificate no. 909782 USSR, 1982, bull. no. 8.
18. Mukonin A.K., Penskoj N.I., Trubetskoy V.A. "Electric drive" ("Elektroprivod"), author's certificate no. 1403326 USSR, 1988, bull. no. 22.
19. Mukonin A.K., Penskoj N.I., Kharchenko A.P., Shiyarov A.I. "Three-phase signal source for an adjustable electric drive" ("Trekhfaznyy istochnik signalov dlya reguliruyemogo elektroprivoda"), author's certificate no. 1026274 USSR, 1983, bull. no. 24.
20. Zaitsev A.I., Shiyarov A.I., Mukonin A.K., Yuryev N.Ya. "The method of controlling a valve motor with a three-section winding of the armature" ("Sposob upravleniya ventil'nym dvigatelem s trekhseksionnoy obmotkoy yakorya"), author's certificate no. 680115 USSR, 1979, bull. no. 30.
21. Mukonin A.K., Shiyarov A.I. "Frequency-current drive with controlled zero current component", *News of Higher Institutions. Electromechanics (Izvestiya vuzov. Elektromekhanika)*, 1990, no. 4, pp. 84-89.
22. Shiyarov A.I., Gerasimov M.I., Murav'yev I.V. "Control systems for reloading manipulators of nuclear power plants with VVER" ("Sistemy upravleniya peregruzochnykh manipulyatorov AES s VVER"), Moscow, Energoatomizdat, 1987, 176 p.
23. Mukonin A.K., Shiyarov A.I., Kochegarov M.V. "Frequency electric drive with quasi trapezoidal current shape", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2008, vol. 4, no. 4, pp. 8-11.
24. Mukonin A.K., Kochegarov M.V. "Energy ratios in a frequency drive with a quasi-trapezoidal current shape", *Computers, Automation and Robotics: Proc. of Scientific and Technical. Conf. of Students and Young Scientists (Vychislitel'nye mashiny, avtomatika i robototekhnika: materialy nauch.-tekhn. konf. studentov i molodykh uchenykh)*, Voronezh, 2008, pp. 34-39.

Submitted 30.06.2020; revised 17.08.2020

Information about the authors

- Aleksandr K. Mukonin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: mukonin_ak@mail.ru, tel. 8(473)243-77-20
- Vladimir A. Medvedev**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: va.medved60@yandex.ru, tel. 8(473)243-77-20
- Viktor A. Trubetskoy**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: viktortrubetskoi@yandex.ru, tel. 8(473)243-77-20
- Dmitriy A. Tonn**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tonnda@mail.ru, tel. 8(473)243-77-20
- Sergey A. Goremykin**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: goremykinsa@yandex.ru, tel. 8(473)243-77-12
- Nikolay V. Sitnikov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nvs17939@mail.ru, tel. 8(473)243-77-12

DOI 10.25987/VSTU.2020.16.4.008

УДК 621.396

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**С.А. Антипов¹, В.Н. Кострова¹, П.В. Николаев¹, Ю.Г. Пастернак^{1,2,3},
К.А. Разинкин¹, В.И. Чугуевский¹**¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия³АО «ИРКОС», г. Москва, Россия

Аннотация: исследуется электродинамическая модель линейной антенной решетки из планарных прямоугольных спиралей для спутниковой связи. Исходя из заданных технических требований был произведен расчёт антенной решетки и проведено численное моделирование с применением метода конечного интегрирования, предложенного Т. Вейландом. Применено Дольф-Чебышевское распределение для снижения уровня боковых лепестков. Моделирование проводилось в программе автоматизированного моделирования CST MW Studio. В качестве излучающего элемента линейной антенной решетки была использована двухплечевая планарная спираль с волноводным питанием, выполненная на материале Rogers 3003 с толщиной 3,04 мм и эффективностью диэлектрической проницаемости $\epsilon = 3$. Приведены внешний вид излучателя, топология волноводного делителя и электродинамическая модель фазированной антенной решетки и её вид сбоку. Приведены результаты численного моделирования основных параметров антенной решетки. Проведены оценка параметров при заданных технических требованиях, сравнительный анализ диаграмм направленности при амплитудных распределениях с пониженным уровнем боковых лепестков и представлены результаты в виде графиков. Обсуждаются конструктивные особенности построения фазированной антенной решетки, а также способы снижения боковых лепестков путем реализации различных амплитудно-фазовых распределений

Ключевые слова: линейная антенная решетка, спутниковая связь, синтез

Введение

В настоящее время стремительно развиваются технологии беспроводной связи. Подход к завершению разработка стандарта пятого поколения связи 5G [1]. В ряде крупных городов уже развернуты сети беспроводной связи, отвечающие современным требованиям. Одним из главных требований к современным телекоммуникационным системам является обеспечение устойчивой связи в труднодоступных районах. В первую очередь труднодоступные районы связаны с географическими факторами: удаленность, рельеф местности и т.п., однако и в современных городах существует задача увеличения качества покрытия в местах плотной городской застройки. Такие задачи, главным образом, призвана решить спутниковая связь [2]. Для уверенного приема спутниковых сигналов требуются антенны с большим коэффициентом усиления и низкой шумовой температурой. По-

этому наиболее распространенными антеннами для спутниковой связи являются зеркальные антенны. Зеркальные антенны, как правило, имеют высокий коэффициент усиления и низкий уровень боковых лепестков. Однако зеркальные антенны не всегда пригодны из-за внушительных массогабаритных характеристик. Другим возможным решением при построении спутниковых антенных систем является использование фазированных антенных решеток (ФАР).

Передовые разработки в антенной технике позволяют создавать компактные, облегченные и относительно недорогие антенны. В первую очередь это антенны, выполненные по микрополосковой технологии. Современное развитие материалов диэлектрических подложек и совершенство технологии изготовления позволяют массово производить недорогие антенны с хорошими рабочими характеристиками [3-7]. На основе таких антенн с высокой повторяемостью параметров можно строить более сложные антенные решетки.

В данной статье приводятся результаты численного моделирования планарной линей-

ной решетки, состоящей из спиральных излучателей. С помощью математического моделирования проведен анализ возможных амплитудно-фазовых распределений (АФР) для снижения уровня боковых лепестков (УБЛ).

Электродинамическая модель линейной антенной решетки

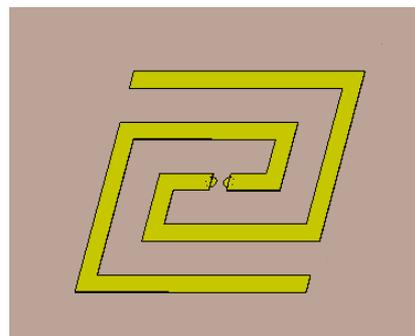
Расчет антенной решетки проводился на основе технических требований, представленных в таблице. Численное моделирование проводилось с использованием метода конечного интегрирования, предложенного Т. Вейландом в 1977 г. [8], реализованном в большинстве современных программ автоматизированного проектирования, таких как CST MW Studio, Ansoft HFSS и т.д.

Технические требования [13]

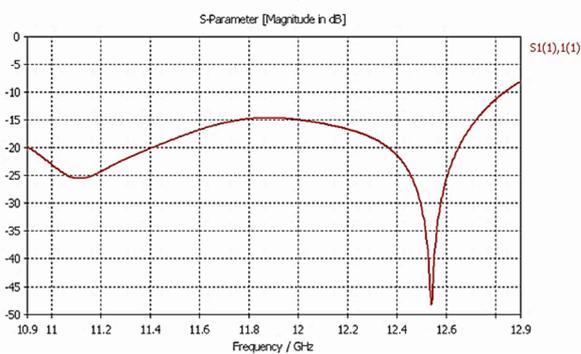
Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон частот	10,95-11,7 ГГц
Коэффициент усиления	≥ 20 дБ
Поляризация	правая круговая
КСВН по входу АР	≤ 2
УБЛ	≤ -13 дБ
ШДН в ГП по уровню - 3 дБ	≤ 2°
ШДН в ВП по уровню - 3 дБ	≤ 80°

Анализируя представленные требования, можно отметить те, которые непосредственно влияют на выбор элементарного излучателя. К таким требованиям отнесем полосу частот, поляризацию и ширину диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Одним из самых подходящих типов антенн в данном случае является спиральная антенна. Так, в качестве излучающего элемента линейной АР решено было использовать двухплечевую планарную спираль с волноводным питанием. Излучатель выполнен на материале Rogers 3003, толщина которого 3,04 мм и эффективность диэлектрической проницаемости $\epsilon=3$. Площадь излучателя составила 6,5x6,5 мм. Конструкция и проектирование излучателя описаны в [9]. Внешний вид излучателя представлен

на рис. 1а. Коэффициент отражения по входу излучателя приведен на рис. 1б.



а)



б)

Рис. 1. Спиральный излучатель: а) внешний вид; б) коэффициент отражения

Коэффициент отражения по входу излучателя не превышает минус 15 дБ во всей полосе рабочих частот. Коэффициент усиления составляет от 5,6 до 6 дБ. Ширина ДН по углу места составляет 82°. Качество приема и передачи антенной волн круговой поляризации можно оценить, вычислив коэффициент эллиптичности (axial ratio). Его можно рассчитать при помощи поляризационного эллипса, который описывает конец вектора E электромагнитной волны на плоскости за один оборот [13]. Коэффициент эллиптичности можно вычислить по следующей формуле (1):

$$AR = \sqrt{\frac{|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_1^2 + E_2^2|}{|E_1|^2 + |E_2|^2 + |E_1^2 - E_2^2|}}, \quad (1)$$

где вектор $|E_1|$ – большая ось поляризационного эллипса; а вектор $|E_2|$ – малая ось поляризационного эллипса.

$AR=1$ (0 Дб) соответствует круговой поляризации, а $AR \rightarrow \infty$ – линейной поляризации. Расчетные графики коэффициента эллиптичности приведены на рис. 2.

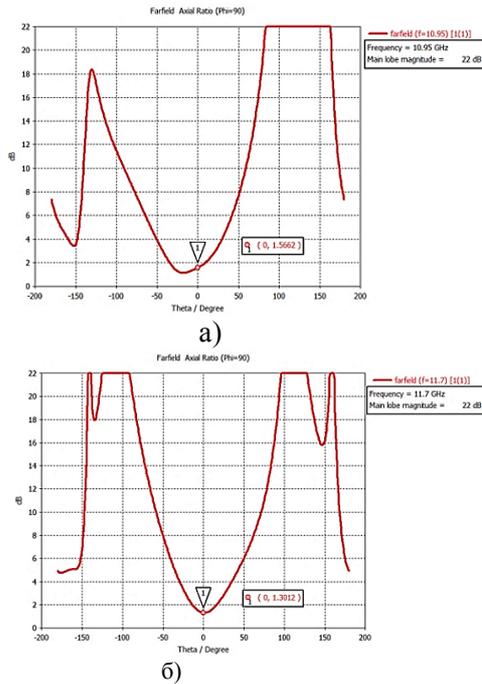


Рис. 2. Коэффициент эллиптичности: а) частота 10,95 ГГц; б) частота 11,7 ГГц

Из представленных графиков наглядно, что коэффициент эллиптичности не превышает 2 дБ, что является хорошим результатом и соответствует круговой поляризации.

Далее была смоделирована линейная антенная решетка, состоящая из 32-х спиральных излучателей с синфазным возбуждением. Внешний вид решетки представлен на рис. 3. Диаграммы направленности при равномерном амплитудно-фазовом распределении, полученные в результате математического и численного моделирования, совпадают с высокой степенью точности, что свидетельствует о корректно построенной модели. Соответствующие графики приведены на рис. 4. Для возбуждения такой антенной решеткой разработан равноамплитудный волноводный делитель мощности с коэффициентом деления 1:32. Делитель изготовлен из СВЧ-ламината марки Rogers Ro3003. Потери в любом из каналов делителя не превышают 2 дБ. Топология делителя показана на рис. 5.

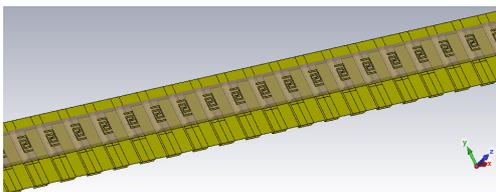


Рис. 3. Электродинамическая модель AP

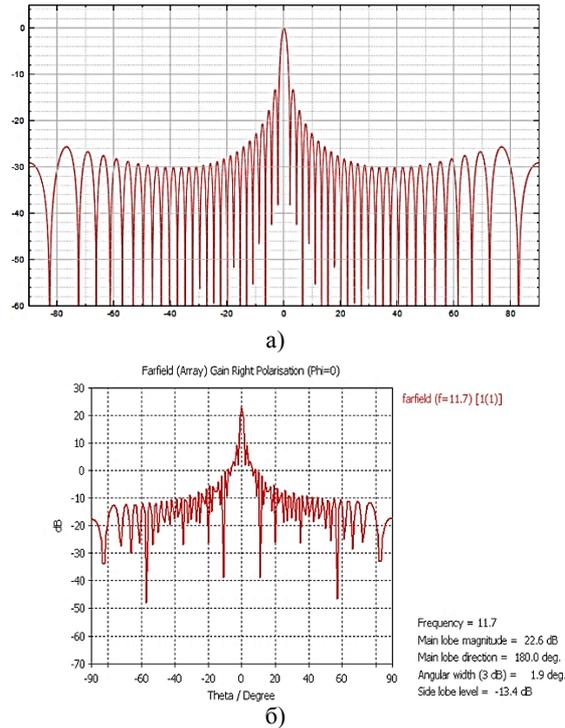


Рис. 4. ДН на частоте 11,7 ГГц: а) математическое; б) численное моделирование

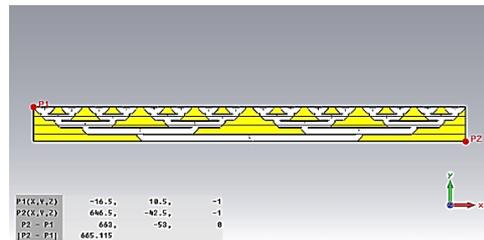


Рис. 5. Топология волноводного делителя

Полученные параметры решетки для частоты 10,95 ГГц составили: коэффициент усиления 22,2 дБ, ширина ДН по азимуту 2°, по углу места 80,9°, УБЛ по азимуту равен минус 14,2 дБ, по углу места равен минус 14,6 дБ. Для частоты 11,7 ГГц, соответственно: коэффициент усиления 22,6 дБ, ширина ДН по азимуту 1,9°, ширина ДН по УМ 79,7°, УБЛ по азимуту равен минус 13,4 дБ, УБЛ по углу места равен минус 14,5 дБ. Как видно из полученных результатов, разработанная модель антенной решетки удовлетворяет техническим требованиям. Однако для успешного применения на практике целесообразно рассмотреть АФР с пониженным УБЛ.

Амплитудные распределения с пониженным уровнем боковых лепестков

Линейные AP с равномерным распределением зачастую не пригодны для практических применений ввиду высокого уровня боковых

лепестков [10]. Снижение УБЛ это одна из важных задач антенной техники, которая позволяет повысить разрешающую способность, точность пеленгования, электромагнитную совместимость, помехозащищенность [13]. В работе [11] сформулированы общие правила для ДН с низким УБЛ. Основным инструментом снижения УБЛ является реализация различного амплитудно-фазового распределения в антенной решетке.

Дольф-Чебышевское распределение относится к одним из таких распределений, с помощью которого можно при заданной ширине ДН уменьшить УБЛ, и, наоборот, при заданном УБЛ уменьшить ширину ДН.

ДН при Дольф-Чебышевском распределении можно записать как [12] (2):

$$F(u) = \sum_{n=1}^N A_n \exp \left\{ j \left[(2n - N - 1) \frac{u}{2} \right] \right\}. \quad (2)$$

Через сумму полиномов Чебышева находятся коэффициенты возбуждения (3):

$$A_n = \frac{2}{N} \left[\xi + 2 \sum_{m=1}^{M-1} T_{N-1} \left(x_0 \cos \frac{\pi m}{N} \right) \cdot \cos \left((2n - 1) \frac{\pi m}{N} \right) \right]. \quad (3)$$

На рис. 6 а, б приведены рассчитанные ДН для линейной АР, которая из 32-х излучателей. При Дольф-Чебышевском распределении АР возбуждается, при этом УБЛ равны -25 и -30 дБ [13].

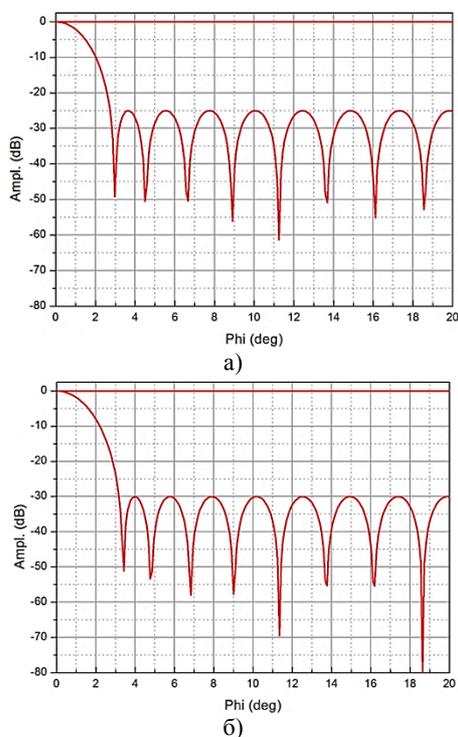


Рис. 6. График ДН для линейной АР при распределении Дольф-Чебышева: а) при УБЛ -25 дБ; б) при УБЛ -30 дБ

АР на частоте 10,95 ГГц при УБЛ -30 дБ обладает следующими параметрами: ШДН

2,5°, а КНД 22 дБ. На частоте АР равной 11,7 ГГц параметры: ШДН 2,3°, КНД 22,3 дБ. Стоит отметить, что невозможность применения Дольф-Чебышевского распределения в сканирующих ФАР является его основным недостатком, т.к. оптимальное АФР можно найти только для одного положения ДН. Рассмотрим еще одно эффективное распределение - n-параметрическое распределение Тейлора. Амплитудное n-распределение Тейлора позволяет добиться большего коэффициента использования поверхности (КИП) с сохранением спадающих к краям дальних лепестков, если изменить положения нескольких ближних нулей. На рис. 7 а, б приведены расчетные ДН при распределении Тейлора разной степени [13].

Как видно из представленных графиков, при уменьшении уровня первых боковых лепестков происходит расширение основного луча. Таким образом, реализовав одно из рассмотренных распределений, можно существенно снизить УБЛ до значений -20 дБ и менее.

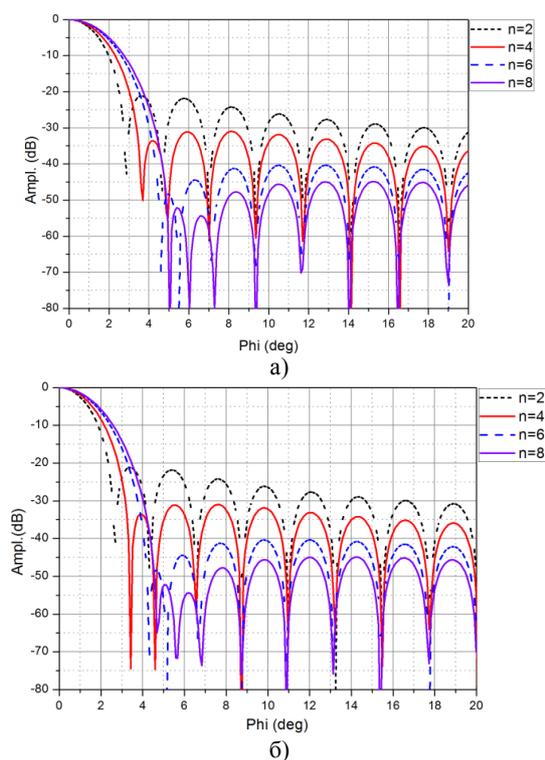


Рис. 7. Графики ДН при распределении Тейлора n-степени: а) на частоте 10,95 ГГц; б) – 11,7 ГГц

Разработанная линейная решетка может использоваться в составе более сложных фазированных антенных решеток. Например, на рис. 8 представлен внешний вид такой ФАР, состоящей из описанных выше линейных антенн.

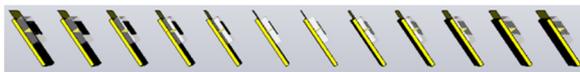


Рис. 8. Фазированная антенная решетка (вид сбоку)

Синфазная ФАР (32×32) элементов с размерами (672×672) мм² будет характеризоваться коэффициентом усиления 35 дБ с учетом потерь 2 дБ в делителе мощности каждой линейной АР 1:32.

Заключение

В результате работы построена электродинамическая модель компактной линейной АР, возбуждаемой волноводным делителем мощности, для спутниковой связи в современных телекоммуникационных системах. Используя численное моделирование, рассчитаны основные параметры решетки. С помощью математического моделирования проведен сравнительный анализ диаграмм направленности при амплитудных распределениях с пониженным уровнем боковых лепестков. Предложен вариант реализации фазированной антенной решетки на основе исследуемой линейной антенной решетки. ФАР характеризуется высоким коэффициентом усиления и небольшими массогабаритными характеристиками.

Литература

1. Fei Hu. Opportunities in 5 G Networks: A research and Development Perspective. CRC Press, New York, 2016. 539 p.
2. Maral G., Bousquet M., Sun Z. Satellite Communications System: System, Techniques and Technology. John Wiley & Sons, 2020. 792 p.

3. Chaudhary P., Kumar A., Yadav A. Pattern diversity MIMO 4G and 5G Wideband Circularly Polarized Antenna with Integrated LTE Band for Mobile Handset // Progress In Electromagnetics Research M. 2020. Vol. 89. P. 111-120
4. Garcia-Marin E., Masa Campos J.L., Sanchez-Olivares P. Planar Array Topologies for 5G Communications in Ku Band // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. № 61(2). P. 112–133.
5. Zhu S., Liu H., Wen P. A new method for achieving miniaturization and gain enhancement of vivaldi antenna array based on anisotropic metasurface // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. № 67(3). P. 112–133.
6. 5G millimeterwave antenna array: design and challenges / J. Zhang, X.H. Ge, Q. Li, M. Guizani and Y.X. Zhang // IEEE Wireless Communications. 2017. Vol. 24. No 2. pp. 106–112.
7. Kumar G., Kumar R. A survey on planar ultra-wideband antennas with band notch characteristics: Principle, design, and applications // International Journal of Electronics and Communications. 2019. Vol. 109. pp. 76-98
8. Weiland T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and Communication. 1977. V. 31. PP. 116-120.
9. Чугуевский В.И., Пастернак Ю.Г., Федоров С.М. Широкополосный планарный излучатель с волноводным питанием для антенных решеток систем спутниковой связи информационных сетей стандарта 5G // Вестник Воронежского института МВД России. 2018. № 1. С. 73-77.
10. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Выс. шк., 1988. 432 с.
11. Taylor T.T. One-Parametr Family of Line Sources Producing Modified $\sin \pi/\pi$ Patterns, Rep. TM 324, Hughes Aircraft Co., Culver City, CA, 1953.
12. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. 2-е изд. М.: «Техносфера», 2012. 560 с.
13. Чугуевский В.И. Планарные антенные решетки для телекоммуникационных систем связи: дисс. ... канд. техн. наук. Воронежский государственный технический университет. Воронеж, 2019.

Поступила 18.06.2020; принята к публикации 19.08.2020

Информация об авторах

Антипов Сергей Анатольевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)246-27-00, e-mail: antp54@mail.ru
Кострова Вера Николаевна – д-р техн. наук, профессор кафедры систем информационной безопасности, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-04, e-mail: kostrova_v@mail.ru
Николаев Павел Викторович – канд. техн. наук, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)246-27-00
Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14); Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а); АО «Иркос» (129626, Россия, г. Москва, а/я 30), e-mail: pasternakvg@mail.ru
Разинкин Константин Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kostyr@mail.ru
Чугуевский Виталий Игоревич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)246-27-00

MODELING OF A LINEAR ANTENNA ARRAY FOR SATELLITE COMMUNICATION OF MODERN TELECOMMUNICATION SYSTEMS

S.A. Antipov¹, V.N. Kostrova¹, P.V. Nikolaev¹, Yu.G. Pasternak^{1,2,3}, K.A. Razinkin¹, V.I. Chuguevskiy¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

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

³JSC «IRCOS», Moscow, Russia

Abstract: in this paper, we study an electrodynamic model of a linear antenna array of planar rectangular spirals for satellite communications. Based on the specified technical requirements, the antenna array was calculated, and numerical modeling was performed using the finite integration method proposed by T. Weiland. Application of the Dolph-Chebyshev distribution to reduce the level of side lobes. The simulation was performed in the CST MW Studio automated simulation program. As the radiating element of the linear antenna array, a two-arm planar helix with waveguide power was used, made on a Rogers 3003 material with a thickness of 3.04 mm and a permittivity efficiency of $\epsilon = 3$. The appearance of the emitter, the topology of the waveguide divider, and the electrodynamic model of the phased array and its side view are presented. The results of numerical simulation of the main parameters of the antenna array are presented. The parameters were evaluated for the specified technical requirements, a comparative analysis of directivity diagrams for amplitude distributions with a reduced level of side lobes, and the results are presented in the form of graphs. The paper discusses the design features of constructing a phased array antenna, as well as ways to reduce the side lobes by implementing various amplitude-phase distributions

Key words: linear antenna array, satellite communication, synthesis

References

1. Fei Hu “Opportunities in 5 G networks: a research and development perspective”, New York, CRC Press, 2016, 539 p.
2. Maral G., Bousquet M., Sun Z. “Satellite communications system: system, techniques and technology”, John Wiley & Sons, 2020, 792 p.
3. Chaudhary P., Kumar A., Yadav A. “Pattern diversity MIMO 4G and 5G wideband circularly polarized antenna with integrated LTE band for mobile handset”, *Progress in Electromagnetics Research M*, 2020, vol. 89, pp. 111-120.
4. Garcia-Marin E., Masa Campos J.L., Sanchez-Olivares P. “Planar array topologies for 5G communications in Ku band”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, no. 61(2), pp. 112–133.
5. Zhu S., Liu H., Wen P. “A new method for achieving miniaturization and gain enhancement of Vivaldi antenna array based on anisotropic metasurface”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, no. 67(3), pp. 112–133.
6. Zhang J., Ge X.H., Li Q., Guizani M., Zhang Y.X. “5G millimeterwave antenna array: design and challenges”, *IEEE Wireless Communications*, Apr. 2017, vol. 24, no. 2, pp. 106–112.
7. Kumar G., Kumar R. “A survey on planar ultra-wideband antennas with band notch characteristics: Principle, design, and applications”, *International Journal of Electronics and Communications*, September 2019, vol. 109, pp. 76-98.
8. Weiland T. “A discretization method for the solution of Maxwell’s equations for six-component fields”, *Electronics and Communication*, 1977, vol. 31, pp. 116-120.
9. Chuguevskiy V.I., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M. “Broadband planar radiator with waveguide power for antenna arrays of satellite communications systems of information networks of 5G standard”, *Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2018, no. 1, pp.73-77.
10. Sazonov D.M. “Antennas and microwave devices” (“Antenny i ustroystva SVCH”), Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 432 p.
11. Taylor T.T. “One-parameter family of line sources producing modified $\sin \pi u/\pi u$ patterns”, Rep. TM 324, Hughes Aircraft Co., Culver City, CA, 1953.
12. Hansen R.S. “Phased antenna arrays” (“Fazirovannyye antennoye reshotki”), Moscow, Tekhnosfera, 2012, 560 p.
13. Chuguev V.I. “Planar antenna arrays for telecommunication systems” (“Planarnyye antennoye reshetki dlya telekommunikatsionnykh sistem svyazi”), Cand. of tech. sciences diss., Voronezh State Technical University, Voronezh, 2019.

Submitted 18.06.2020; revised 19.08.2020

Information about the authors

Sergey A. Antipov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: antp54@mail.ru

Vera N. Kostrova, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kostrova_v@mail.ru

Pavel V. Nikolaev, Cand. Sc. (Technical), Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473) 246-27-00

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), Leading Engineer of JSC “IRCOS” (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), Senior Researcher, 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

Konstantin A. Razinkin, Dr. Sc. (Technical), Professor Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kostyr@mail.ru

Vitaliy I. Chuguevskiy, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ
ОТВЕТВИТЕЛЕЙ НА ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВЫХ СТРУКТУРАХ****А.В. Останков¹, Н.Н. Щетинин², С.Ю. Дашян³**¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**²**Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Россия**³**Университет Лилля, Вильнёв-д'Аск, Франция**

Аннотация: представлена авторская методика проектирования двухшлейфного направленного ответвителя на планарных многосекционных встречно-штыревых структурах. Использование встречно-штыревых структур позволяет значительно уменьшить габариты топологии, что особенно актуально для диапазона УВЧ. Начальный этап методики предполагает получение эквивалентной схемы ответвителя на Т- или П-образных секциях с сосредоточенными индуктивными и ёмкостными элементами, включая расчёт их номинальных значений. На этапе перехода от электрической схемы с сосредоточенными элементами к планарной топологии используется оригинальное аналитическое соотношение для определения числа секций встречно-штыревой структуры по величине сосредоточенной ёмкости. Приведена методика получения аналогичных по содержанию аналитических соотношений для любых других, отличных от использованных, геометрических и диэлектрических параметров секции. На заключительной стадии предполагается локальное использование аппарата оптимизации САПР. Сочетание параметрической оптимизации и готовых топологических решений позволяет значительно сократить время на проектирование микрополосковых миниатюрных ответвителей. Методика апробирована применительно к проектированию направленного ответвителя с рабочей частотой 0,9 ГГц. При этом площадь синтезированной топологии двухшлейфного ответвителя составила 30 % от площади традиционной топологии при несущественном ухудшении основных показателей

Ключевые слова: направленный ответвитель, встречно-штыревая структура, схема замещения, планарная топология, методика проектирования

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

Введение

Использование в микрополосковых устройствах планарных встречно-штыревых структур позволяет существенно уменьшить габаритные размеры, например, направленных ответвителей, делителей-сумматоров мощности, кроссоверов, фильтров и т. д. Как правило, подобные микроволновые устройства классически формируются с помощью шлейфов строго определённой электрической длины, что приводит к значительным размерным характеристикам, особенно в диапазоне УВЧ [1].

Один из методов синтеза двухшлейфного направленного ответвителя предполагает переход от предварительно составленной электрической схемы замещения на сосредоточенных элементах к планарной топологии, эквивалентной по электрическим характеристикам.

В работе [2] предложена эквивалентная электрическая схема замещения двухшлейфного направленного ответвителя, в которой четвертьволновые отрезки микрополосковых линий реализованы в виде Т- и П-образных струк-

тур с сосредоточенными индуктивными и ёмкостными элементами.

Целью работы является создание методики проектирования микрополосковых двухшлейфных ответвителей на встречно-штыревых структурах, основанной на переходе от схемы замещения на сосредоточенных элементах к планарной топологии.

Методы и результаты

На рис. 1 показан описанный в [2] симметричный реактивный направленный восьмиполосник на основе Т-образных секций с индуктивными и ёмкостными элементами, представляющий собой эквивалентную электрическую схему замещения двухшлейфного направленного ответвителя.

Для обеспечения равного деления входной мощности относительно каждого порта необходимо чтобы секции, содержащие элементы L_1 , C_1 и L_2 , C_2 , обладали бы на рабочей частоте эквивалентными сопротивлениями 35 Ом и 50 Ом соответственно и электрической длиной, равной $\theta = 90^\circ$.

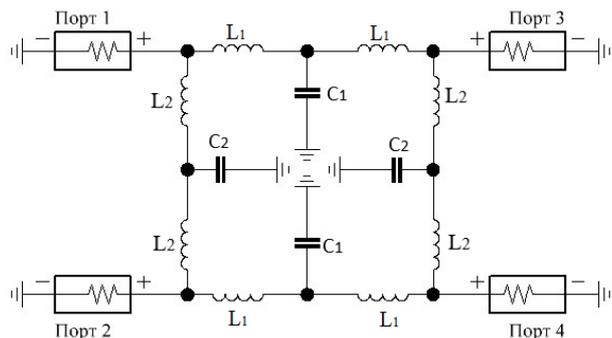


Рис. 1. Схема замещения двухшлейфного направленного ответвителя на основе Т-образных секций

Для достижения указанных характеристических импедансов Z_0 и электрической длины θ необходимо наличие в Т-образном шлейфе двух индуктивностей величиной [3]

$$L = \frac{Z_0 \cdot \text{tg}(\theta/2)}{2\pi f}, \quad (1)$$

где f – рабочая частота, и ёмкости –

$$C = \frac{\sin(\theta)}{2\pi \cdot f \cdot Z_0}. \quad (2)$$

В таблице ниже приведены номинальные значения сосредоточенных реактивных элементов в составе Т-образных секций ответвителя со схемой замещения на рис. 1, рассчитанные на основе приведённых формул применительно к рабочей частоте 0,9 ГГц.

Номинальные значения сосредоточенных элементов Т-образных секций для $f = 0,9$ ГГц

L_1 , нГн	C_1 , пФ	L_2 , нГн	C_2 , пФ
6,192	5,055	8,846	3,539

Частотные характеристики двухшлейфного ответвителя, реализованного по схеме с сосредоточенными элементами на рис. 1, получены методом синфазно-противофазного возбуждения [4-6] и представлены на рис. 2. При расчёте частотных характеристик в качестве входа использован первый порт.

Из рис. 2, в частности, следует, что на частоте 0,9 ГГц направленный ответвитель со схемой на рис. 1 характеризуется расчётными значениями коэффициента отражения S_{11} и развязки S_{21} , равными «минус» 39 дБ. Величина переходного ослабления S_{41} ответвителя и его рабочее затухание S_{31} отличаются не более чем на 0,1 дБ от требуемого уровня ослабления, характерного для трехдецибельного ответвителя. Разность фаз сигналов, наблюдаемых на портах

4 и 3 направленного ответвителя, составляет «минус» 90° .

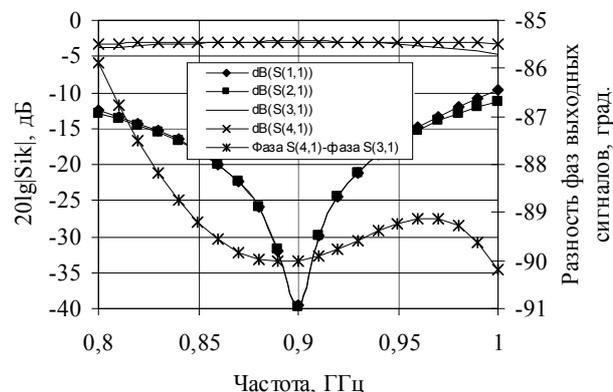


Рис. 2. Частотные характеристики направленного ответвителя со схемой на рис. 1 и элементами из приведённой таблицы

Важнейшим этапом предлагаемой методики является переход от уже найденных номинальных значений сосредоточенных L- и C-элементов к их эквивалентным микрополосковым структурам.

Будем полагать, что для реализации распределенной ёмкости используется микрополосковая встречно-штыревая структура, элементарная секция которой, состоящая из пары штырей, связанных по полю, показана на рис. 3.



Рис. 3. Элементарная секция многосекционного встречно-штыревого конденсатора

Пусть толщина h и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r материала подложки встречно-штыревого конденсатора заданы и соответственно равны: $\epsilon_r = 3,38$, $h = 0,508$ мм. Длина штырей структуры и величина зазора между штырями также известны и составляют: $L = 5$ мм, $W = 0,2$ мм, $G = 0,2$ мм. Заметим, что выбор значений указанных размеров обусловлен прогнозируемыми оценками габаритных размеров направленного ответвителя для частоты 0,9 ГГц.

Необходимая ёмкость встречно-штыревого конденсатора может быть реализована путём многократного наращивания числа элементарных секций в его составе.

В работе [7] для приведённых выше геометрических параметров элементарной секции конденсатора получено относительно

простое аналитическое выражение, позволяющее рассчитать количество секций встречно-штыревой структуры, необходимое для реализации требуемой ёмкости C (в пФ):

$$n = \frac{f^2 - 1,1 \cdot f - 59,6 + 10^3 \cdot C}{4,2 \cdot f^2 - 2,1 \cdot f + 208}, \quad (3)$$

где f – рабочая частота (в ГГц). Аналогичная по содержанию формула может быть получена для любых других геометрических и диэлектрических параметров секции. Для этого достаточно заполнить на основе результатов электромагнитного моделирования планарного элемента в доступной САПР двухмерный массив реализуемых величин ёмкости при разных значениях числа секций и частоты и интерполировать полученную зависимость $C(n)$ линейной функцией.

Согласно (3), для реализации сосредоточенных ёмкостей в 3,539 и 5,055 пФ следует у встречно-штыревых структур иметь количество секций, равное 17 и 24 соответственно. Топологии таких структур показаны на рис. 4.

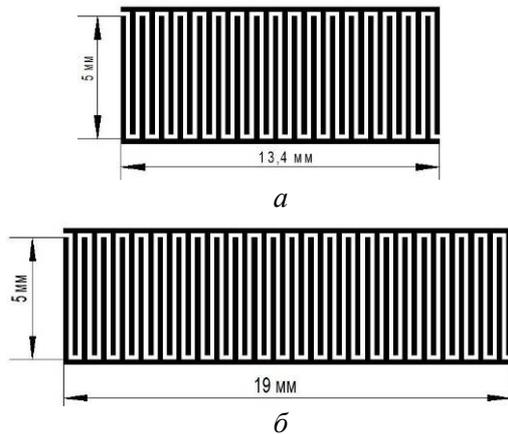


Рис. 4. Микрополосковые встречно-штыревые структуры с распределенной ёмкостью 3,539 (а) и 5,055 пФ (б)

На рис. 5 представлены частотные зависимости встречно-штыревых структур с топологиями на рис. 4, полученные с помощью строгого электромагнитного моделирования методом моментов в САПР ADS [8]. Подложка смоделированной топологии реализована на основе фольгированного диэлектрического материала серии Rogers 4003С толщиной 0,508 мм с указанной выше диэлектрической проницаемостью и $\text{tg}\delta = 0,0027$ [9].

Из рис. 5 следует, что на рабочей частоте 0,9 ГГц величина распределенной ёмкости 24-секционной топологии составляет 4,788 пФ, то есть на 5,3 % меньше предполагаемого значе-

ния в 5,055 пФ. Заметим, что наличие погрешности связано с определенными ограничениями формулы (3), описанными в [7]. В свою очередь, величина ёмкости 17-секционной топологии при $f = 0,9$ ГГц равна 3,431 пФ, что меньше заявленного значения 3,539 пФ на 3,1 %.

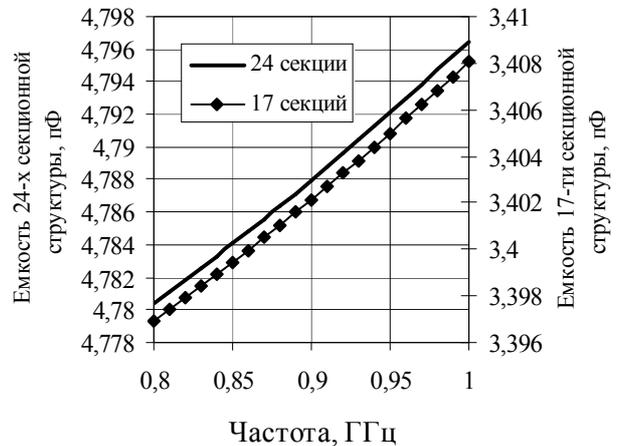


Рис. 5. Частотные зависимости ёмкости планарных встречно-штыревых структур на рис. 4

Для рационального использования площади диэлектрической подложки разумно выполнить реконфигурацию топологий синтезированных встречно-штыревых структур, которая заключается в усечении (в плоскости порта) секционной группы пополам с одновременным увеличением длины штырей. Топология преобразованных структур показана на рис. 6.

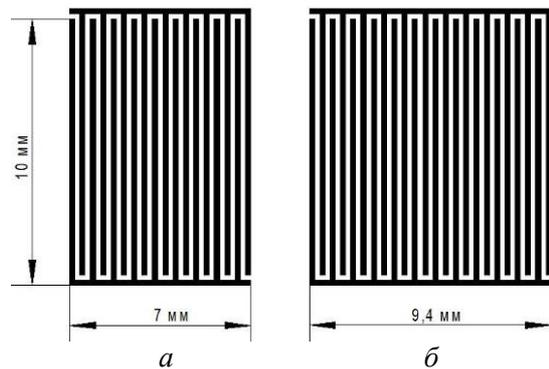


Рис. 6. Реконфигурированные встречно-штыревые структуры с распределенной ёмкостью 3,431 (а) и 4,788 пФ (б)

Заметим, что предлагаемое преобразование сопровождается незначительным снижением ёмкости, что следует из рис. 7, где показаны результаты электромагнитного моделирования структур, изображенных на рис. 6. Очевидно, что выявленное уменьшение ёмкости может

быть эффективно скорректировано за счёт увеличения длины штырей секций.

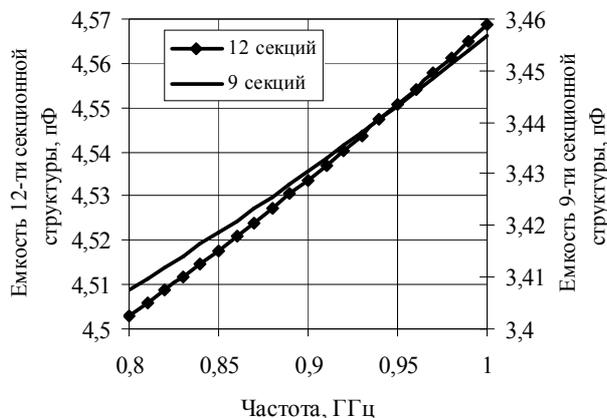


Рис. 7. Частотные зависимости ёмкости планарных встречно-штыревых структур на рис. 6

После того как определены конечные конфигурации встречно-штыревых структур, следует рассчитать оптимальные геометрические параметры высокоомных шлейфов, которые соединяют плечи ответвителя. Наиболее целесообразно осуществить это с использованием возможностей параметрической оптимизации в САПР. На рис. 8 показаны конечные топологии шлейфов направленного ответвителя.

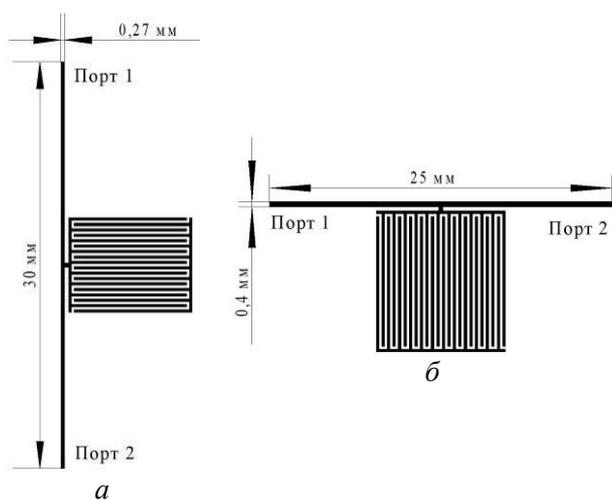


Рис. 8. Топологии шлейфов с характеристическим импедансом 50 (а) и 35 Ом (б)

В качестве целевых функций при оптимизации на рабочей частоте ($f = 0,9$ ГГц) разумно использовать: минимум величины коэффициента отражения (например, «минус» 40 дБ), минимум отклонения разности фаз между рабочим и вспомогательным выходами от «минус»

90°, наибольшее соответствие эквивалентного сопротивления структур величинам 50 и 35 Ом.

На рис. 9 показана микрополосковая топология разработанного трехдецибельного малогабаритного направленного ответвителя.

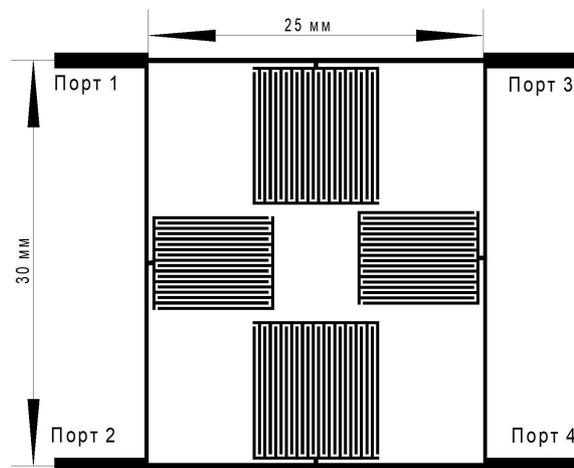


Рис. 9. Топология направленного ответвителя на встречно-штыревых структурах

Топология ответвителя реализована на основе ёмкостных встречно-штыревых структур и является результатом сдвоенного совмещения планарных топологий, показанных на рис. 8. Габаритные размеры синтезированной топологии двухшлейфного направленного ответвителя составляют 30×25 мм², что на 70 % меньше площади традиционной топологии.

Результаты электромагнитного моделирования методом моментов разработанного направленного ответвителя на встречно-штыревых структурах представлены на рис. 10.

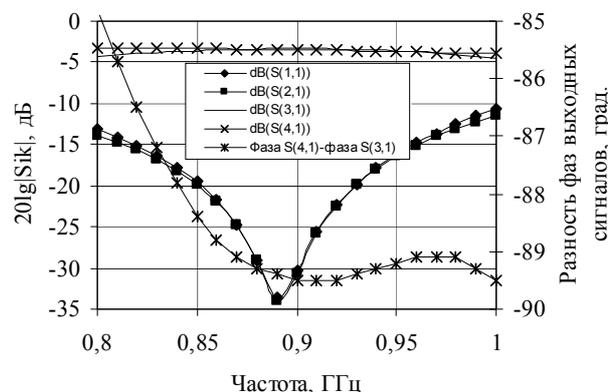


Рис. 10. Характеристики спроектированного направленного ответвителя на встречно-штыревых структурах, полученные на основе моделирования

Незначительное отклонение от центральной частоты 0,9 ГГц минимума коэффициента

отражения S_{11} и развязки S_{21} обусловлено взаимным влиянием близко расположенных встречно-штыревых структур шлейфов с характеристическим импедансом 50 и 35 Ом и является следствием миниатюризации. На центральной частоте 0,9 ГГц параметры S_{11} и S_{21} составляют около «минус» 30 дБ. В частотной полосе 0,85–0,95 ГГц величина переходного S_{41} и рабочего S_{31} ослаблений отличается не более чем на 0,6 дБ от уровня 3 дБ. Разность фаз выходных сигналов, наблюдаемых на 4-м и 3-м портах в полосе частот 0,85–0,95 ГГц, отличается от «минус» 90° менее чем на 1,8°.

Заключение

Разработана оригинальная методика проектирования микрополоскового двухшлейфного направленного ответвителя на встречно-штыревых структурах. Методика основана на переходе от электрической схемы замещения ответвителя с сосредоточенными элементами к планарным топологиям. Переход предполагает использование аналитических соотношений, связывающих размерные характеристики топологий с электрическими параметрами, а также локальное применение аппарата параметрической оптимизации САПР на конечной стадии проектирования. Такой подход позволяет существенно сократить машинно-временные затраты на разработку миниатюрных эффективных ответвителей, так как не требует значительного ко-

личества итераций при оптимизации встречно-штыревых структур.

Литература

1. Останков А.В., Щетинин Н.Н. Микрополосковые направленные ответвители УВЧ и СВЧ диапазонов // Радиостроение. 2017. № 5. С. 1-37.
2. Bahl I.J. Lumped Element for RF and Microwave Circuits. Artech House, 2003. 488 с.
3. Pozar D.M. Microwave Engineering. New Jersey: Wiley, 2004. 720 с.
4. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р. Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ. М.: Связь, 1971. 388 с.
5. Щетинин Н.Н., Останков А.В., Воробьева Е.И. Математическая модель для проектирования микрополоскового направленного ответвителя на квазисосредоточенных элементах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 3.1. С. 66-70.
6. Калинин Ю.Е., Останков А.В., Щетинин Н.Н. Микрополосковый двухшлейфный направленный ответвитель со специальными характеристиками // Радиотехника. 2016. № 6. С. 44-49.
7. Щетинин Н.Н., Останков А.В., Мельник В.А. Реализация планарного элемента топологии микрополоскового устройства по заданной емкости в схеме замещения // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2019. С. 50-55.
8. ADS 2011 Product Release [Electronic resource]. Available at: URL: <http://www.keysight.com/ru/pd-1835794/ads2011> (Accessed 10 January 2020).
9. Investigation of electrical parameters of corundum-based material in X-band / D.S. Klygach, M.G. Vakhitov, D.A. Zherebtsov, O.A. Kudryavtsev, N.S. Knyazev, A.I. Malkin // Journal of materials science: Materials in electronics. 2017. Vol. 28. No 18. P. 13621-13625.

Поступила 06.05.2020; принята к публикации 19.08.2020

Информация об авторах

Останков Александр Витальевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: avostankov@mail.ru
Щетинин Никита Николаевич — преподаватель кафедры основ радиотехники и электроники, Воронежский институт ФСИН России (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская 1-а), e-mail: nikita.shetinin@mail.ru
Дашян Сергей Юрьевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор лаборатории им. Поля Пенлеве, Университет Лилля, Корпус М2, Научный городок, 59655 Вильнёв-д'Аск, Франция), e-mail: sergeui.dachian@univ-lille1.fr

METHODOLOGY OF DESIGNING MICRO-STRIP DIRECTIONAL COUPLERS ON INTERDIGITATED STRUCTURES

A.V. Ostankov¹, N.N. Shchetinin², S.Yu. Dachian³

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, Russia

³University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France

Abstract: the article presents the author's methodology for designing a two-loop directional coupler on planar multi-section interdigital structures. The use of interdigitated structures allows significantly reducing the dimensions of the topology, which is especially important for the UHF range. The initial stage of the methodology involves obtaining an equivalent coupler circuit in T- or U-shaped sections with concentrated inductive and capacitive elements, including the calculation of their nominal values. At the stage of transition from an electric circuit with lumped elements to a planar topology, the original analytical relation is used to determine the number of sections of the interdigital structure by the value of the lumped capacity. There is a

technique for obtaining analytical relations of a similar content for any other, different from the used, geometric and dielectric parameters of the section. At the final stage, local use of the CAD optimization apparatus is assumed. The combination of parametric optimization and ready-made topological solutions can significantly reduce the time for designing microstrip miniature couplers. The technique was tested in relation to the design of a directional coupler with an operating frequency of 0.9 GHz. Whereas the area of the synthesized topology of the double-loop coupler is 30% of the area of the traditional topology with a slight deterioration of the main indicators

Key words: directional coupler, interdigital structure, equivalent circuit, planar topology, designing methodology

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

References

1. Ostankov A.V., Shchetinin N.N. "UHF and SHF micro-strip directional couplers", *Radio Engineering (Radiostroenie)*, 2017, no. 5, pp. 1-37.
2. Bahl I.J. "Lumped element for RF and microwave circuits", Artech House, 2003, 488 p.
3. Pozar D.M. "Microwave engineering", New Jersey, Wiley, 2004, 720 p.
4. Feldshtejn A.L., Yavich L.R. "Synthesis of four-pole and eight-pole microwave devices" ("Sintez chetyrekhpolysnikov i vosmipolysnikov na SVCH"), Moscow, Svyaz, 1971, 388 p.
5. Shchetinin N.N., Ostankov A.V., Vorobjeva E.I. "Mathematical model for the microstrip directional coupler on a quasi-lumped element", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 3-1, pp. 66-70.
6. Kalinin Yu.E., Ostankov A.V., Shchetinin N.N. "Microstrip two-loop directional coupler with special characteristics", *Radio engineering (Radiotekhnika)*, 2016, no. 6, pp. 44-49.
7. Shchetinin N.N., Ostankov A.V., Mel'nik V.A. "Planar element implementation of a microstrip topology on specified capacity in the equivalent circuit", *Radiolocation, Navigation, Communications (RLNC*2019), 25th International Scientific and Technical Conference (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. tr.XXV Mezhdunar.nauch.-tekhn. konf.)*, 2019, pp. 50-55.
8. ADS 2011 Product Release, available at: <http://www.keysight.com/ru/pd-1835794/ads2011> (date of access: 10 January 2020).
9. Klygach D.S., Vakhitov M.G., Zherebtsov D.A., Kudryavtsev O.A., Knyazev N.S., Malkin A.I. "Investigation of electrical parameters of corundum-based material in X-band", *Journal of materials science: Materials in electronics*, 2017, vol. 28, no. 18, pp. 13621-13625.

Submitted 06.05.2020; revised 19.08.2020

Information about the authors

Aleksandr V. Ostankov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru

Nikita N. Shchetinin, Lecturer, Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service (1a Irkutskaya str., Voronezh, 394072, Russia), e-mail: nikita.shetinina@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

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПАРАТОРОВ КОДА
С УЧЕТОМ ЗАДАННОГО БАЗИСА**

А.А. Пирогов¹, Ю.А. Пирогова¹, С.А. Гвозденко¹, Д.В. Шардаков¹, Б.И. Жилин²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

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

Аннотация: программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) представляют собой конфигурируемые интегральные схемы, логика работы которых определяется посредством их программирования. Применение ПЛИС позволяет получать устройства, способные менять конфигурацию, подстраиваться под определенную задачу за счет гибко изменяемой, программируемой их структуры. При разработке сложных устройств могут применяться в качестве компонентов для проектирования готовые сложно-функциональные блоки (СФ-блоки). Использование программных СФ-блоков позволяет наиболее эффективно задействовать их в конечной структуре, в значительной степени сократить затраты на проектирование. В данной работе было проведено моделирование структуры, временной анализ двоичных компараторов, выполненных по различным схемам реализации. В ходе выполнения работы были изучены инструменты построения схемы цифрового узла с использованием встроенного схемного редактора, а также стандартных библиотечных элементов, создания собственных уникальных модулей, формирование шин. Ряд модулей проекта были получены на основе прямого программирования на языке описания аппаратуры Verilog. Функциональное моделирование модулей, построение временных диаграмм работы были произведены в программе iSim. Физическая верификация проекта проведена на основе отладочной платы ПЛИС Spartan 3E

Ключевые слова: двоичный компаратор кода, карта Карно, модель, временная диаграмма

Введение

Цифровые двоичные компараторы кода предназначены для сравнения двух кодовых комбинаций. Применяются компараторы в вычислительной технике и приборостроении как в виде готовых микросхем, так и в качестве функциональных узлов системы. Актуальность реализации компараторов на ПЛИС обусловлена возможностью получения гибкой программируемой архитектуры с изменяемыми параметрами.

На рис. 1 представлено схемное обозначение цифрового компаратора. Компараторы предназначены для сравнения двух n-разрядных кодовых слов (А и В), имеют 2ⁿ входов и 3 выхода F_{A>B}, F_{A=B} и F_{A<B}.

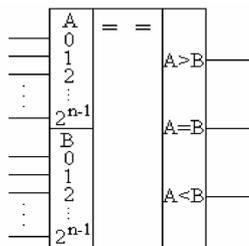


Рис. 1. Двоичный компаратор кода

Вырабатываемые функции цифрового компаратора F_{A>B}, F_{A=B} и F_{A<B} показывают результат сравнения кодов, если результат соответствует одной из функций, функция устанавливается в единицу. Функции F_{A>B}, F_{A=B} и F_{A<B} компаратора должны быть равны следующим значениям [1]:

$$F_{A=B} = \overline{A\bar{B}} + \overline{\bar{A}B} = \begin{cases} 1 & \text{при } A = B \\ 0 & \text{при } A \neq B \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{A>B} = A\bar{B} = \begin{cases} 1 & \text{при } A > B \mid \begin{matrix} A = 1, B = 0 \\ A = 0, B = 1 \end{matrix} \\ 0 & \text{при } A \leq B \mid \begin{matrix} A = 0, B = 0 \\ A = 1, B = 1 \end{matrix} \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{A<B} = \bar{A}B = \begin{cases} 1 & \text{при } A < B \mid \begin{matrix} A = 0, B = 1 \\ A = 1, B = 0 \end{matrix} \\ 0 & \text{при } A \geq B \mid \begin{matrix} A = 1, B = 1 \\ A = 0, B = 0 \end{matrix} \end{cases} \quad (3)$$

Моделирование цифрового компаратора кода

Синтезированная схема компаратора на основе данных функций для сравнения одноразрядных чисел А и В представлена ниже.

Синтез схемы компаратора для двухразрядных кодов аналогичен. Если кодовые слова равны A=a₀a₁ и B=b₀b₁, то получаем A>B, если a₁>b₀ или a₀>b₀ при a₁=b₁. Аналогично, A<B,

если $a_1 < b_0$ или $a_0 < b_0$ при условии $a_1 = b_1$. Если $a_0 = b_0$ и $a_1 = b_1$, то получаем равенство $A = B$. Ниже представлена таблица истинности двухразрядного компаратора кода.

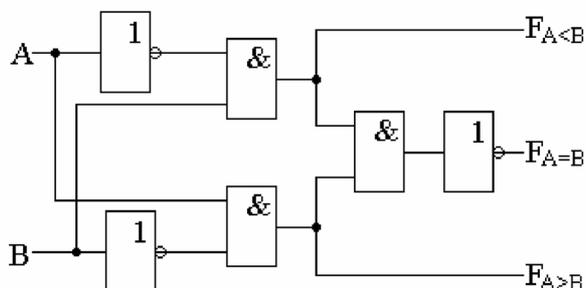


Рис. 2. Схема одноразрядного компаратора

Таблица истинности компаратора

Номер набора	a_1	a_0	b_1	b_0	$F_{A=B}$	$F_{A>B}$	$F_{A<B}$
0	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	1	0	0	1
2	0	0	1	0	0	0	1
3	0	0	1	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	0
5	0	1	0	1	1	0	0
6	0	1	1	0	0	0	1
7	0	1	1	1	0	0	1
8	1	0	0	0	0	1	0
9	1	0	0	1	0	1	0
10	1	0	1	0	1	0	0
11	1	0	1	1	0	0	1
12	1	1	0	0	0	1	0
13	1	1	0	1	0	1	0
14	1	1	1	0	0	1	0
15	1	1	1	1	1	0	0

На следующем рис. 3 представлены карты Карно функций компаратора, построенные на основе его таблицы истинности.

Используя данные карты Карно, возможно провести минимизацию СДНФ (совершенных дизъюнктивных нормальных форм) заданных функций, полученных на основе таблицы истинности.

$$F_{A=B} = \overline{a_1} \overline{a_0} \overline{b_1} \overline{b_0} + \overline{a_1} a_0 \overline{b_1} b_0 + a_1 a_0 b_1 b_0 + \overline{a_1} a_0 b_1 \overline{b_0} = \overline{a_1} b_1 (\overline{a_0} \overline{b_0} + a_0 b_0) + a_1 b_1 (\overline{a_0} \overline{b_0} + a_0 b_0) = (a_1 \oplus b_1) (\overline{a_0} \oplus \overline{b_0}); \quad (4)$$

$$F_{A>B} = \overline{a_1} b_1 + a_0 \overline{b_1} \overline{b_0} + a_1 a_0 b_0 = \overline{a_1} b_1 \overline{a_0} \overline{b_1} \overline{b_0} + a_1 a_0 b_0; \quad (5)$$

$$F_{A<B} = \overline{a_1} b_1 + \overline{a_0} \overline{a_1} b_0 + \overline{a_0} b_1 b_0 = \overline{a_1} b_1 \overline{a_0} \overline{a_1} b_0 + \overline{a_0} b_1 b_0. \quad (6)$$

Функции компаратора также могут быть приведены к единому базису. На основе полученных выражений проведем синтез схемы двухразрядного компаратора кода в полном базисе [2].

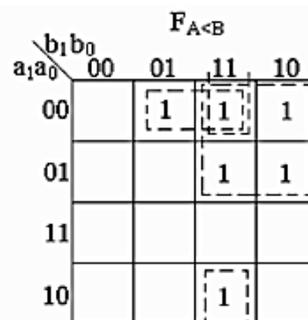
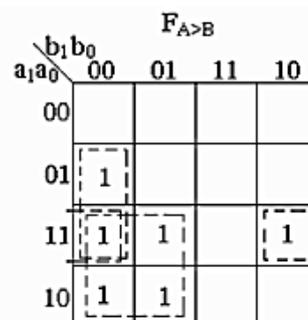
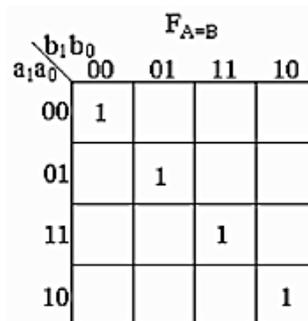


Рис. 3. Карты Карно функций компаратора

На рис. 4 модель компаратора, в полном базисе полученная на основе синтезированной схемы в схемном редакторе программного комплекса Active HDL.

Для проведения тестирования модуля необходимо сформировать главный модуль (Top module), в котором указываются выходные порты ввода/вывода для формирования тестовых последовательностей и контроля результатов работы. Структура главного модуля представлена ниже [3]:

```

module CMP_top(input [0:6] sw,
output [0:2] ld);
  CMP    impl(.A0(sw[0]),    .A1(sw[1]),
.B0(sw[2]),    .B1(sw[3]),    .F_A_B(sw[4]),
.F_A_big_B(sw[5]), .F_B_big_A(sw[6]),
.F1_A_B(ld[0]),    .F1_A_big_B(ld[1]),
.F1_B_big_A(ld[2]));

```

```
endmodule
```

CMP – имя файла с расширением *.vhd.
RTL код исследуемого двоичного компаратора.

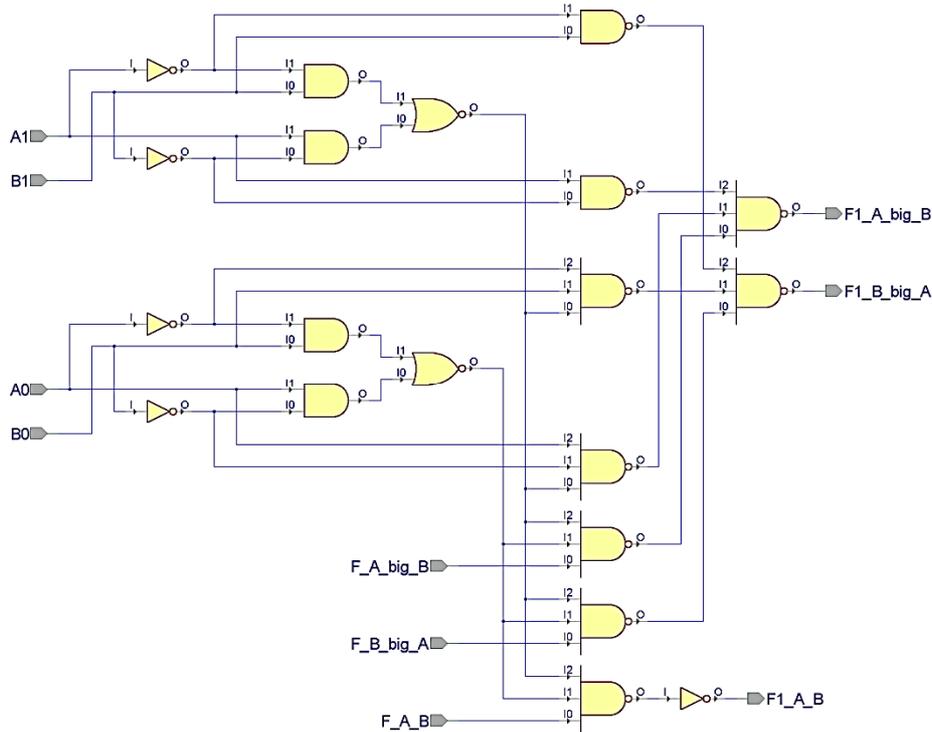


Рис. 4. Модель двухразрядного компаратора кода

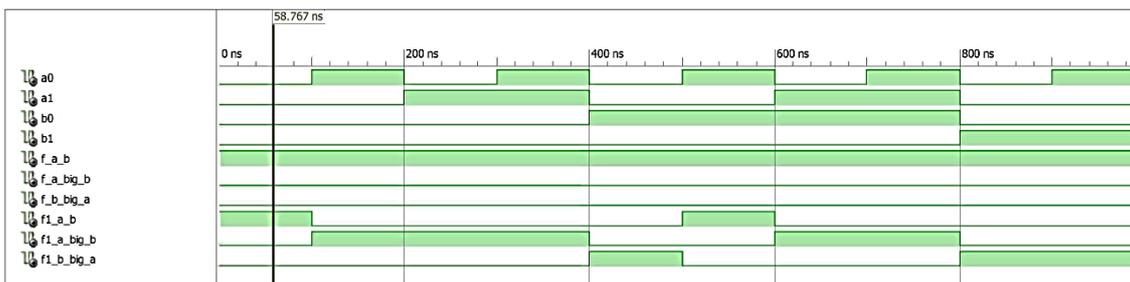


Рис. 5. Временная диаграмма работы цифрового компаратора кода

Для формирования приведенной временной диаграммы работы устройства компаратора необходимо в программном комплексе сформировать набор тестовых векторов для каждого входного сигнала. В данном случае задаются переменные импульсы с интервалом моделирования 100нс.

В результате получена временная диаграмма работы устройства (рис. 5). Проанализировав данную диаграмму, можно сделать вывод, что построенная модель компаратора работает корректно, в соответствии с заданными функциями $F_{A>B}$, $F_{A=B}$ и $F_{A<B}$ [3].

Активные состояния уровней выходных сигналов модели во всех наборах таблицы истинности соответствуют единичным состояни-

ям, что подтверждает адекватность полученной модели. Для запуска компаратора на входы $A=B$ (F_A_B) подается логическая единица, а на входы $A>B$ ($F_A_big_B$) и $A<B$ ($F_B_big_A$) нули.

Моделирование цифровых компараторов кода в заданных базисах

На рис. 10 и 11 представлены модели компараторов в заданных базисах. Переход между конъюнктивной и дизъюнктивной формой проведен на основе закона де Моргана:

$$Y = \overline{\overline{X} + \overline{Y}} = \overline{\overline{X} \overline{Y}} = \overline{\overline{\overline{\overline{X} \overline{Y}}}}; \quad (7)$$

$$Y = \overline{\overline{X} \overline{Y} \overline{Z}} = \overline{\overline{X} + \overline{Y} + \overline{Z}} = \overline{\overline{\overline{\overline{\overline{X} + \overline{Y} + \overline{Z}}}}}; \quad (8)$$

Как видно из представленных рисунков, схема, соответствующая базису «И-НЕ», в свой состав включает меньшее количество вентиляей.

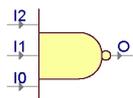


Рис. 6. Базис «И-НЕ»

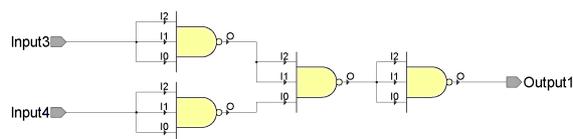


Рис. 7. Элемент «ИЛИ-НЕ» в базисе «И-НЕ»

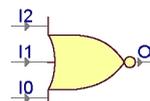


Рис. 8. Базис «ИЛИ-НЕ»

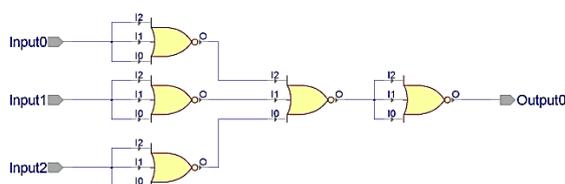


Рис. 9. Элемент «И-НЕ» в базисе «ИЛИ-НЕ»

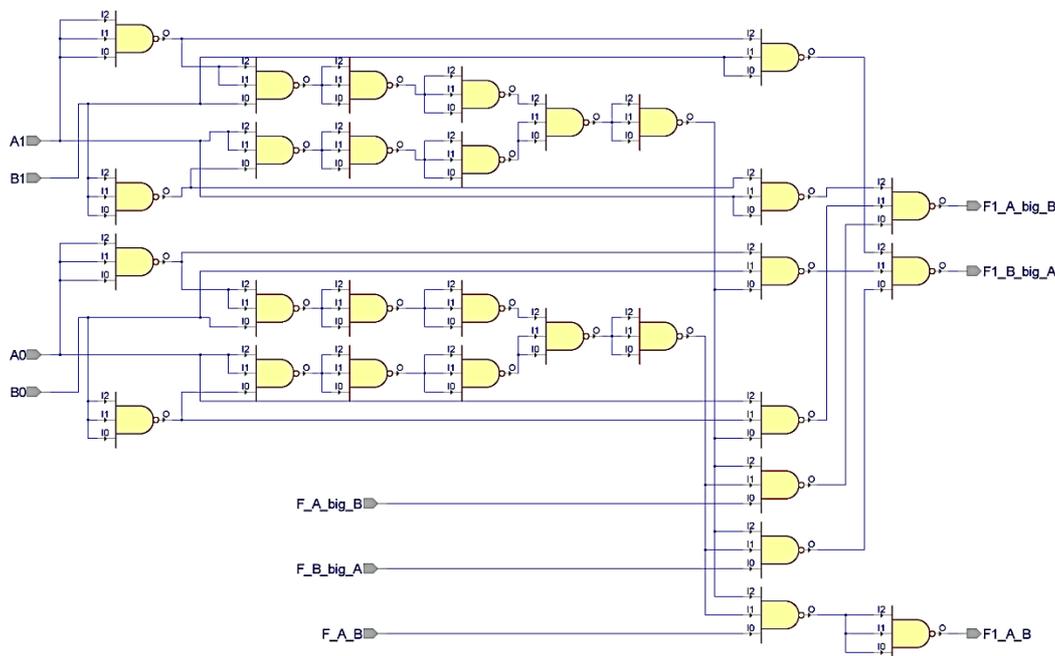


Рис. 10. Модель компаратора в базисе «И-НЕ»

Моделирование цифрового каскадного компаратора кода

В данном исследовании проводится моделирование четырехразрядного компаратора

кода. Для расширения разрядности сравниваемых слов используется метод каскадного соединения компараторов. В данном случае не происходит усложнения схемы, и сохраняются требуемые показатели быстродействия устройства.

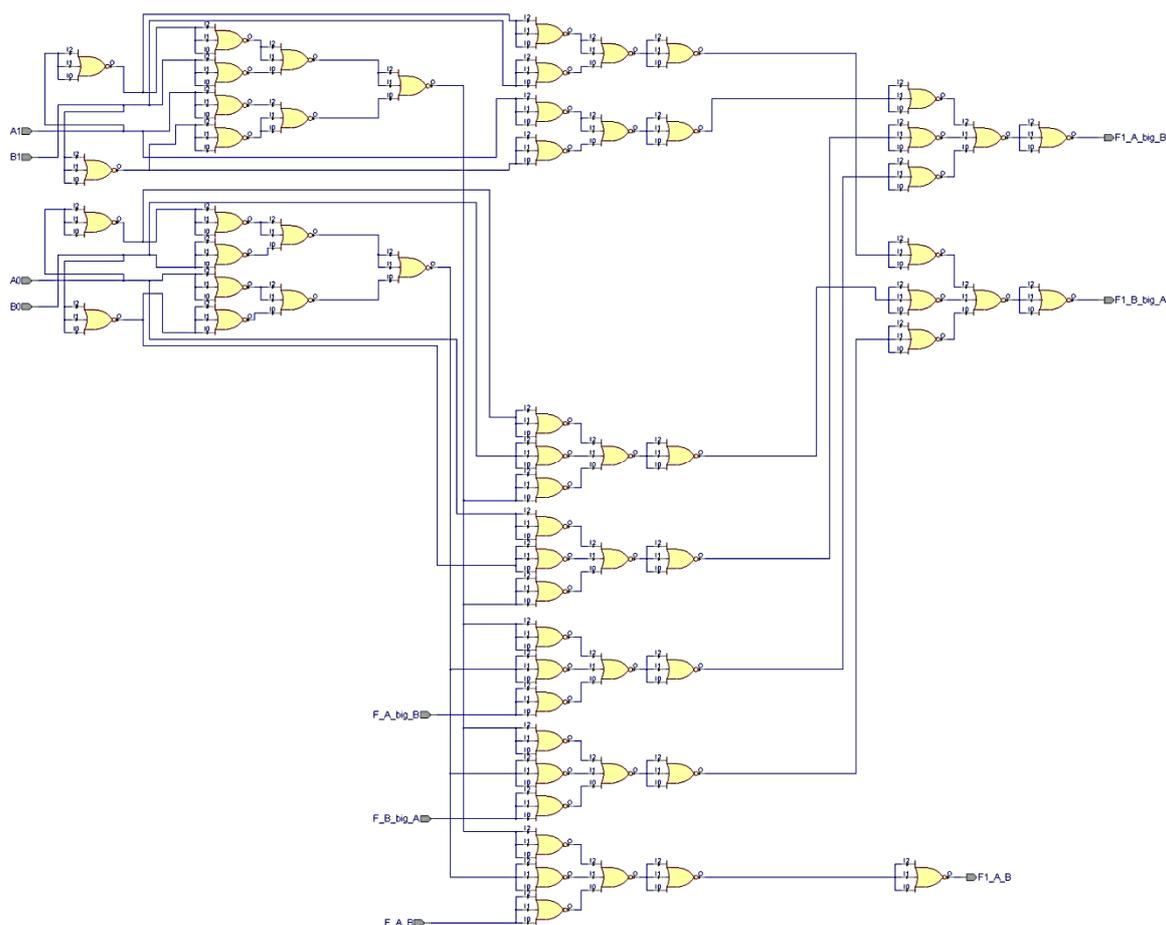


Рис. 11. Модель компаратора в базе «ЗИЛИ-НЕ»

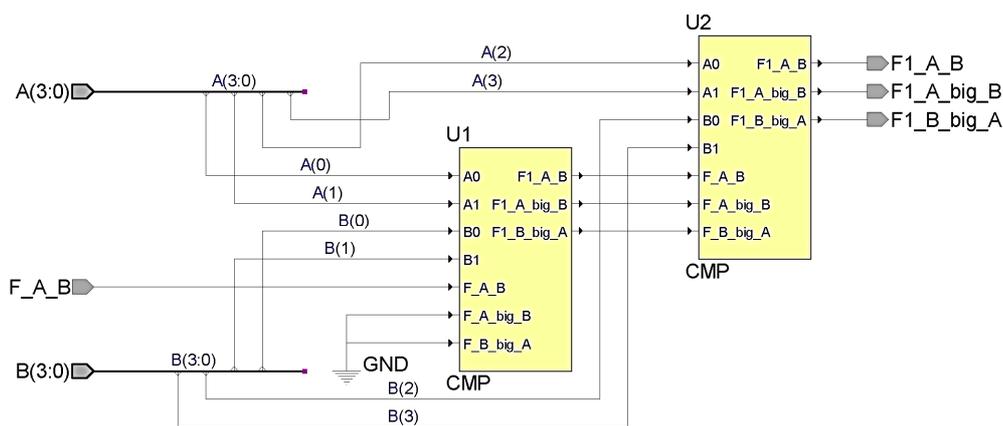


Рис. 12. Схема каскадного четырехразрядного двоичного компаратора

В полученной структуре использован принцип построения иерархических модулей, где в качестве внутреннего использован уникальный блок компаратора, построенный и внесенный в библиотеку элементов. Многоразрядный компаратор получен путем соединения входов управления и соответствующих выходов.

Схема соединения компараторов для получения каскадной структуры приведена на рис. 12. На рис. 13 приведена временная диаграмма работы.

Реализация главного модуля (Top module) на языке описания аппаратуры Verilog представлена ниже:

```

module CMP2_top(input [0:7] sw, input [0:0]
btn,
output [0:2] ld);
CMP4 impl(.A(sw[0:3]), .B(sw[4:7]),
.F_A_B(btn[0]),
.F1_A_B(ld[0]), .F1_A_big_B(ld[1]),
.F1_B_big_A(ld[2]));

```

endmodule

CMP4 – имя файла с расширением *.vhd.
RTL код проектируемого четырехразрядного двоичного компаратора.

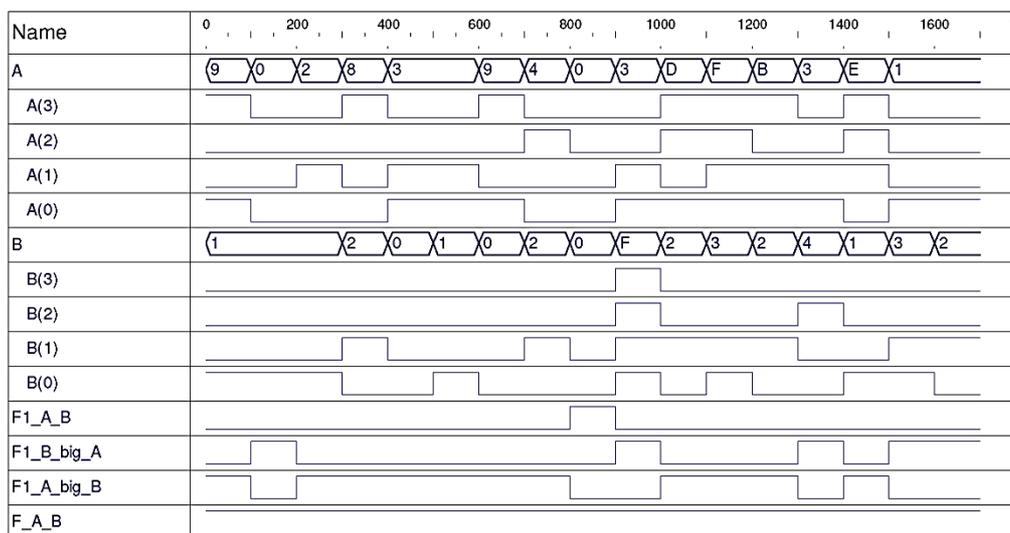


Рис. 13. Временная диаграмма работы каскадного четырехразрядного двоичного компаратора

Заключение

В результате проведенного исследования реализована методика проектирования цифровых устройств на базе ПЛИС с учетом требований заданного базиса. Как было отмечено выше, при разработке сложных устройств могут применяться в качестве компонентов для проектирования готовые СФ-блоки. Использование программных СФ-блоков позволяет наиболее эффективно задействовать их в конечной структуре, в значительной степени сократить затраты на проектирование.

Моделирование было проведено в программных комплексах Xilinx ISE и Active HDL с использованием оболочки программирования на языке Verilog. Полученные временные диаграммы вариантов исполнения компараторов подтверждают адекватную работу моделей согласно математическому описанию устройства. В независимости от выбранного базиса реализации функции компараторов не отличаются. В работе также рассмотрен такой немаловажный вопрос, как построение каскадной схемы устройства для увеличения разрядности

сравниваемых кодовых слов. Результаты работы в дальнейшем могут быть использованы в качестве готовых блоков для проектирования более сложных цифровых устройств на ПЛИС. Модели имеют открытую архитектуру, что позволяет адаптировать их в системе под требуемую задачу. Полученная архитектура также позволяет расширять и наращивать структуру, увеличивать разрядность сравниваемых кодов за счет оптимального количества задействованных вентилях.

Литература

1. Клочков Г.Л. Цифровые устройства и микропроцессоры: учебник. Воронеж: ВИРЭ, 2005. 320с.
2. Самодуров А.С., Антипов С.А. Моделирование пеленгационных характеристик трехэлементной кольцевой антенной решетки с учетом влияния носителя// Радиотехника. 2017. № 6. С. 145-148.
3. Методика получения поведенческой модели для оценки отклонения значащих моментов цифрового сигнала от идеальных положений во времени / М.Ю. Чепелев, А.А. Пирогов, А.В. Башкиров, И.А. Бурмистров // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2019. № 2. С. 14-25.

Поступила 08.06.2020; принята к публикации 19.08.2020

Информация об авторах

Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Пирогова Юлия Александровна – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: gvendilon@mail.ru

Гвозденко Сергей Анатольевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: jgsar@mail.ru

Шардаков Дмитрий Вячеславович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: demon.shar@yandex.ru

Жилин Борис Иванович – канд. техн. наук, старший преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), e-mail: borishms@mail.ru

METHOD OF DESIGNING CODE COMPARATORS TAKING INTO ACCOUNT A GIVEN LOGICAL BASIS

A.A. Pirogov¹, Yu.A. Pirogova¹, S.A. Gvozdenko¹, D.V. Shardakov¹, B.I. Zhilin²

¹**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

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

Abstract: programmable logic integrated circuits (FPGAs) are configurable integrated circuits, the logic of which is determined by programming them. The use of FPGAs makes it possible to obtain devices capable of changing the configuration, adapting to a specific task due to their flexible, programmable structure. When developing complex devices, ready-made complex functional blocks (IP-cores) can be used as components for design. The use of software IP-cores allows you to use them most effectively in the final structure, to significantly reduce the cost of design. In this work, we performed modeling of the structure, a temporary analysis of binary comparators performed according to various implementation schemes. In the course of the work, the tools for constructing a digital node circuit using the built-in circuit editor were studied: Using standard library elements, creating your own unique modules, forming buses. A number of project modules were obtained through direct programming in the Verilog hardware description language. Functional modeling of modules, construction of time diagrams of work were performed in the iSim program. Physical verification of the project was carried out on the basis of the Spartan 3E FPGA debugging board

Key words: binary code comparator, Carnot map, model, time diagram

References

1. Klochkov G.L. “Digital devices and microprocessors” (“Tsifrovye ustroystva i mikroprotssory”), textbook, Voronezh, VIRE, 2005, 320 p.
2. Samodurov A.S., Antipov S.A. “Modeling direction-finding characteristics of a three-element ring antenna array taking into account the influence of the carrier”, *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2017, no. 6, pp. 145-148.
3. Chepelev M.Yu., Pirogov A.A., Bashkirov A.V., Burmistrov I.A. “Methodology for obtaining a behavioral model for assessing the deviation of significant moments of a digital signal from ideal positions in time”, *Bulletin of Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii)*, 2019, no. 2, pp. 14-25..

Submitted 08.06.2020; revised 19.08.2020

Information about the authors

Aleksandr A. Pirogov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Yuliya A. Pirogova, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: gvendilon@mail.ru

Sergey A. Gvozdenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: jgsar@mail.ru

Dmitriy V. Shardakov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: demon.shar@yandex.ru

Boris I. Zhilin, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, 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: borishms@mail.ru

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ОДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ, ПОСТРОЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫМИ РАССЕЙВАТЕЛЯМИ

Ю.Г. Пастернак^{1,2,3}, Е.А. Рогозин², Р.Е. Рогозин¹, С.М. Фёдоров¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

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

³АО «ИРКОС», г. Москва, Россия

Аннотация: исследована возможность создания однородной цилиндрической линзы на основе последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала. В качестве ячейки периодической структуры метаматериала используется Н-образная структура, расположенная на диэлектрической подложке. На основе проведенного анализа открытых литературных и научно-технических источников рассмотрено влияние размера металлических проводников Н-образной структуры на значения действительной части эффективной диэлектрической проницаемости метаматериала. Показано распределение поля в азимутальной плоскости при нормальном падении линейно-поляризованной плоской волны на поверхность линзы из однородного диэлектрика и метаматериала. Для уточнения величины фокусного расстояния рассмотрены направленные характеристики линзы облучателя с линзой из однородного диэлектрика и метаматериала. Сделаны выводы о величине фокусного расстояния. Исследованы направленные и частотные характеристики линзы из метаматериала при разном повороте облучателя относительно центра линзы, линзы из однородного диэлектрика, а также о схожести и различии направленных и частотных характеристик двух линз, о влиянии поворота облучателя относительно центра линзы на характеристики линзы из метаматериала. Полученные результаты будут полезны при проектировке линзовых антенн на основе последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала

Ключевые слова: однородная цилиндрическая линза, метаматериал, направленные и частотные характеристики

Введение

Многолучевые антенные системы (МЛС) позволяют формировать многолепестковую диаграмму направленности (ДН) и широко используются в радионавигации, радиолокации, радиоастрономии, в системах мобильной связи и в других радиосистемах различного назначения.

В настоящее время разработаны различные конструкции МЛС с использованием зеркальных или линзовых антенн, антенных решеток (АР), а также активных фазированных антенных решеток (АФАР) и гибридных зеркальных антенн (ГЗА) [1].

Линзовые антенны позволяют создавать осесимметричные антенные системы без затенения [1]. В настоящее время существуют различные конструкции линзовых антенн: замедляющие или ускоряющие бифокальные линзы [2]; сферические или цилиндрические линзы Люнеберга [3,4]; линзы Ротмана и схожие конструкции [5,6]; линзы Макграфа на основе печатных плат [7,8] и др.

Один из известных способов реализации линзовых антенн – реализация линз из однородного диэлектрика, имеющего форму шара или цилиндра. Использование однородных диэлектриков для изготовления линз приводит к увеличению массы и потерям [9]. Поэтому в диапазоне сантиметровых или миллиметровых волн широко применяют искусственные диэлектрики и метаматериалы, позволяющие изготавливать линзы различных конструкций с меньшей массой и потерями [9].

Метаматериалы широко используются при создании линзовых антенн, поскольку позволяют создавать среды с большим показателем преломления (который трудно получить при использовании однородных материалов) или среды с градиентно изменяющимся показателем преломления.

Недостатки при использовании метаматериалов: дисперсия; анизотропия; ограниченный частотный диапазон.

Таким образом, цель работы – исследование возможности изготовления однородной цилиндрической линзы, работающей на частотах выше 10 ГГц, из последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала.

Моделирование периодической структуры метаматериала

В качестве ячейки периодической структуры метаматериала используется Н-образная структура, расположенная на диэлектрической подложке, длины вертикальных и горизонтальных проводников которой имеют одинаковую длину w (рис. 1).

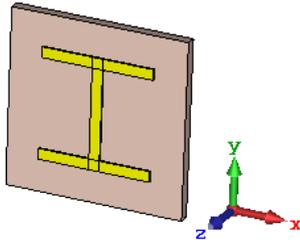


Рис. 1. Внешний вид Н-образной структуры метаматериала

Данная структура используется в работе, поскольку обладает дисперсией, анизотропией, значениями действительной части эффективной магнитной проницаемости $Re(\mu_{eff})$, близкими к единице [10], а действительная часть диэлектрической проницаемости $Re(\epsilon_y)$ зависит от w . В работе [10] проведены исследования эффективных параметров Н-образной структуры, в ходе которых установлено, что в зависимости от соотношения w/a (a – размер ячейки метаматериала по оси ox и oy) возможно несколько случаев.

При $w/a \rightarrow 1$ – сильно связный [10]. Этот случай характерен тем, что между двумя горизонтальными проводниками соседних ячеек сосредоточена большая величина поверхностного заряда [10]. Накопленный поверхностный заряд способствует увеличению дипольного момента. Это приводит к большим резонансным значениям $Re(\epsilon_y)$ [10].

При $w/a < 1$ не наблюдается большой величины поверхностного заряда [10]. Уменьшение соотношения w/a приводит к уменьшению $Re(\epsilon_y)$ дисперсии [10].

Поскольку исследуемая линза должна работать на частотах выше 10 ГГц, в работе используются геометрические размеры метаматериала, как и в [11]. Моделирование метаматериала (далее и линзы) осуществляется в среде моделирования трехмерных электромагнитных структур CST STUDIO SUITE 2020.

Расчет $Re(\epsilon_y)$ метаматериала осуществляется с использованием метода, основанного на измерении S -параметров, пересчитанных к границам метаматериала [12,13].

На рис. 2(а) показана зависимость $Re(\epsilon_y)$ от частоты f в случае $w/a \rightarrow 1$ при разных w , а на рис. 2(б) – зависимость $Re(\epsilon_y)$ от частоты f в случае $w/a < 1$ при разных w .

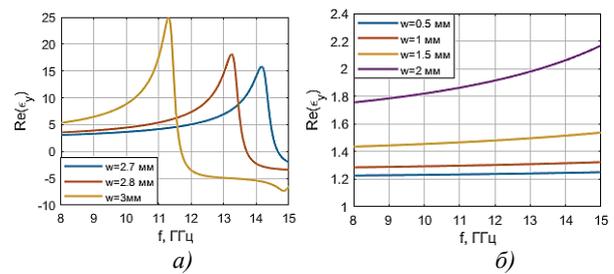


Рис. 2. Графики зависимости $Re(\epsilon_y)$ от частоты f при $w/a \rightarrow 1$ (а) и $w/a < 1$ (б)

Анализ полученных результатов показывает, что для проектировки однородной цилиндрической линзы целесообразно $w/a < 1$ – в этом случае нет резонансных значений у $Re(\epsilon_y)$.

Геометрические параметры линзы:

- высота – 33,3 мм;
- диаметр кратен трем длинам волны на частоте 10 ГГц – 100 мм.

Диэлектрическая проницаемость однородной линзы равна двум. Длина проводников метаматериала $w = 2$ мм, т.е. $Re(\epsilon_y) = 1,82$ на частоте 10 ГГц. Данное значение w используется в работе, поскольку:

- методика расчета [12,13] не учитывает влияние соседних ячеек периодической структуры, а также параметры окружающей среды или влияние расположенных рядом предметов (например, антенн или усилителей) [14];
- $Re(\epsilon_y)$ увеличивается с ростом частоты из-за наличия дисперсии (см. рис. 2(б)).

На рис. 3 показан внешний вид исследуемых линз. В качестве облучателя используются два вертикально расположенных друг под другом полуволновых вибратора с рефлектором и директором.

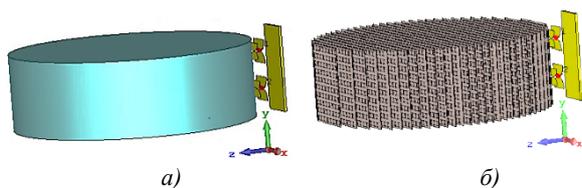


Рис. 3. Внешний вид линз: *a* – из однородного диэлектрика; *б* – из метаматериала

Результаты моделирования фокусного расстояния

На рис. 4 приведено распределение поля в азимутальной (Н-плоскости) для линзы из однородного диэлектрика на частоте 10 ГГц и 15 ГГц.

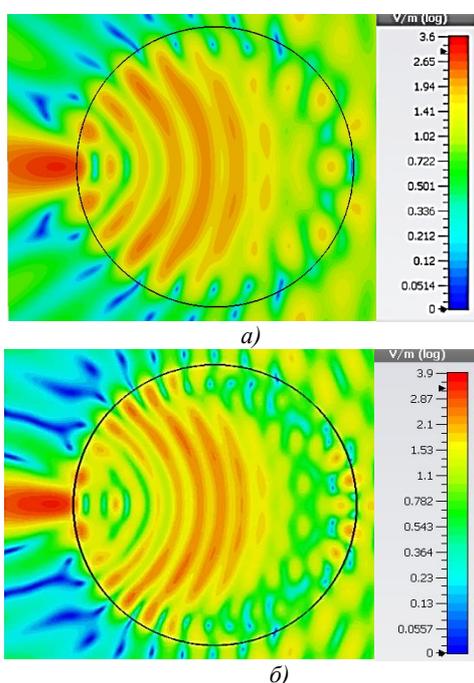


Рис. 4. Распределение поля в Н-плоскости линзы из однородного диэлектрика на частоте 10 ГГц (*a*) и 15 ГГц (*б*)

Анализ распределения поля показывает, что фокусное расстояние не перемещается с ростом частоты и находится в пределах 61-66 мм. Для уточнения величины фокусного расстояния рассматриваются направленные характеристики облучателя с линзой (см. рис. 3(*a*)) при разном фокусном расстоянии. На рис. 5-6 приведены зависимости коэффициента направленного действия (КНД), коэффициента использования поверхности (КИП), ширины ДН по уровню -3 дБ, уровня боковых лепестков (УБЛ) от частоты f . А также на рис. 5-6 приведены зависимости КНД и ширины ДН для синфазного равноамплитудного раскрыва, вычисленные согласно [6], от частоты f .

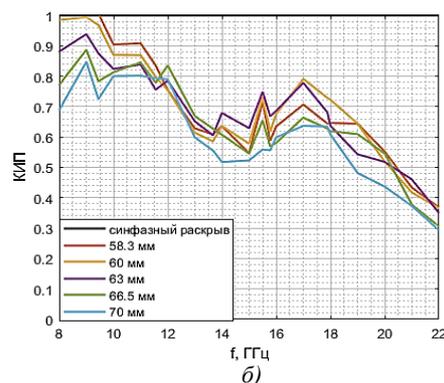
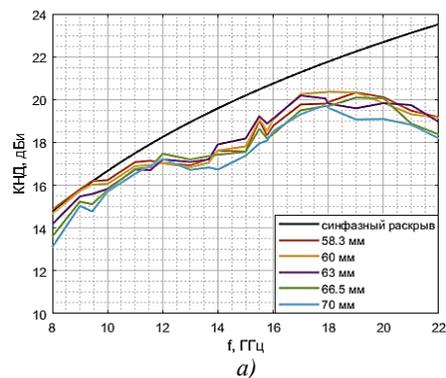


Рис. 5. Графики зависимости КНД (*a*) и коэффициента использования поверхности (*б*) от частоты f при разном фокусном расстоянии

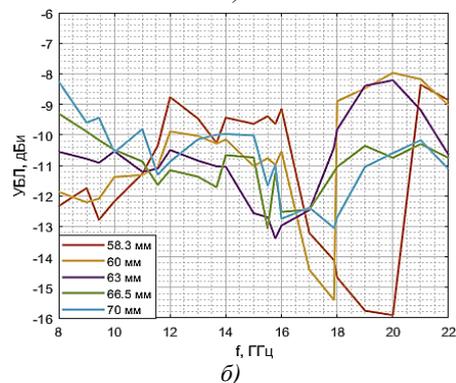
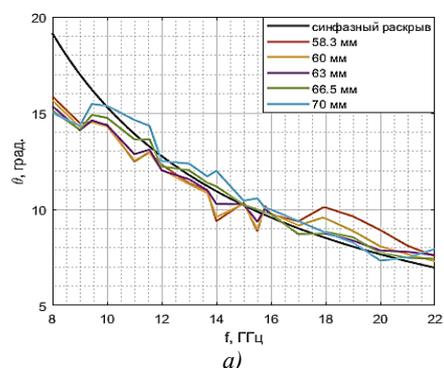


Рис. 6. Графики зависимости ширины ДН (*a*) и УБЛ (*б*) от частоты f при разном фокусном расстоянии

Анализ полученных результатов показывает, что при фокусном расстоянии равном 61.3 мм рабочая полоса облучателя с линзой 10-17 ГГц, т.е. шире, чем при других фокусных расстояниях.

Дальнейшее моделирование линзы из однородного диэлектрика проводится с использованием фокусного расстояния 66.3 мм, поскольку рабочая полоса у облучателя с линзой 9-24 ГГц, т.е. шире, чем при других фокусных расстояниях (рис. 5 и 6).

На рис. 7 приведено распределение поля в азимутальной (Н-плоскости) для линзы из параллельных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала на частоте 10 ГГц и 15 ГГц.

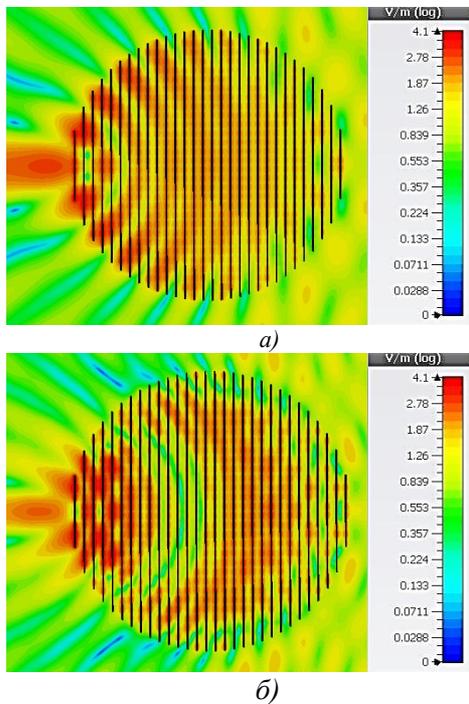


Рис. 7. Распределение поля в Н-плоскости линзы из метаматериала на частоте 10 ГГц (а) и 15 ГГц (б)

Анализ распределения поля показывает, что, несмотря на наличие дисперсии у $\text{Re}(\epsilon_y)$, фокусное расстояние не перемещается с ростом частоты и находится в пределах 61-67 мм.

Для уточнения величины фокусного расстояния рассматриваются направленные характеристики облучателя с линзой (см. рис. 3(б)) при разном фокусном расстоянии. На рис. 8-9 приведены зависимости КНД, КИП, ширины ДН по уровню -3 дБ, УБЛ от частоты f . Там же приведены зависимости КНД и ширины ДН для синфазного равно-амплитудного раскрытия, вычисленные согласно [6], от частоты f .

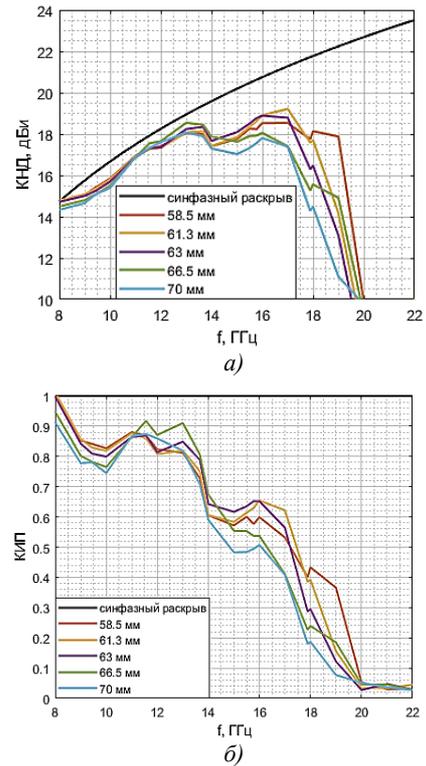


Рис. 8. Графики зависимости КНД (а) и коэффициента использования поверхности (б) от частоты f при разном фокусном расстоянии

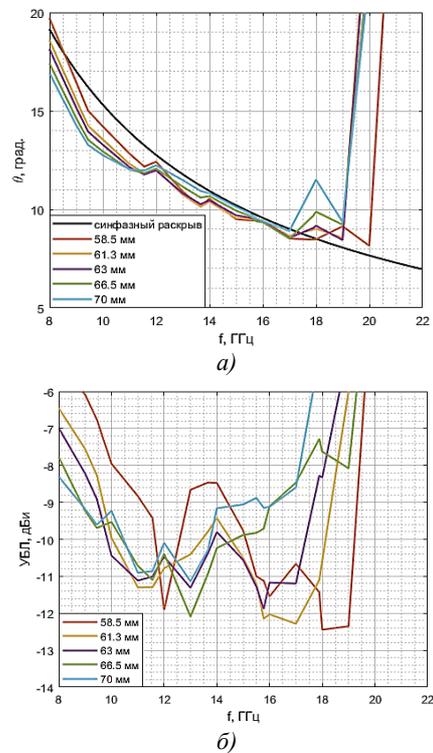


Рис. 9. Графики зависимости ширины ДН (а) и УБЛ (б) от частоты f при разном фокусном расстоянии

Анализ полученных результатов показывает, что при фокусном расстоянии равном 61.3 мм рабочая полоса облучателя с линзой 10-17 ГГц, т.е. шире, чем при других фокусных расстояниях (см. рис. 8 и 9). Дальнейшее моделирование линзы из метаматериала осуществляется с фокусным расстоянием равным 61.3 мм.

Таким образом, у линзы из однородного диэлектрика и линзы из последовательно расположенных параллельных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала фокусные расстояния отличаются на 5 мм.

Результаты моделирования направленных и частотных характеристик

Поскольку целью работы является исследование возможности изготовления однородной цилиндрической из последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала, необходимо оценить направленные и частотные характеристики облучателя с линзой при разном повороте облучателя относительно центра линзы (далее поворот облучателя).

На рис. 10-12 приведены зависимости КНД, КИП, ширины ДН по уровню -3 дБ, УБЛ, коэффициента отражения по входу от частоты f при разном повороте облучателя для линзы из метаматериала, а также для линзы из однородного диэлектрика, и приведены зависимости КНД и ширины ДН для синфазного равноамплитудного раскрыва, вычисленные согласно [6], от частоты f .

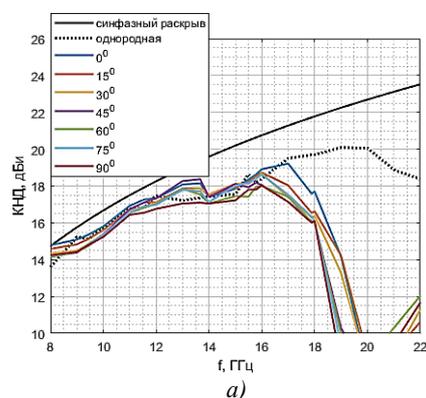


Рис. 10. Графики зависимости КНД (а) и коэффициента использования поверхности (б) от частоты f при разном фокусном расстоянии

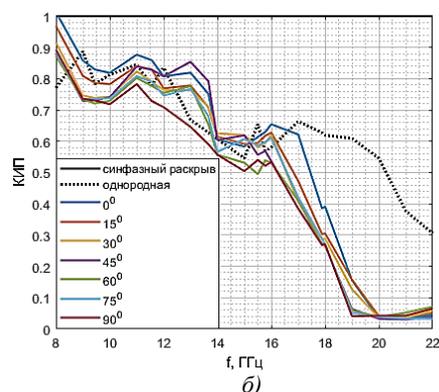


Рис. 10. Графики зависимости КНД (а) и коэффициента использования поверхности (б) от частоты f при разном фокусном расстоянии (продолжение)

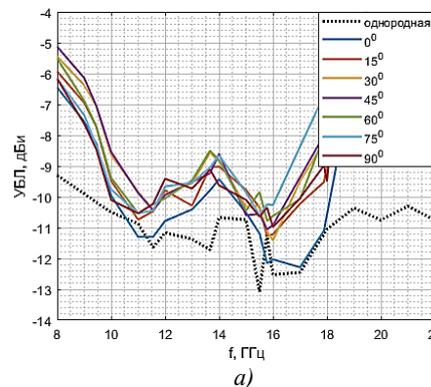
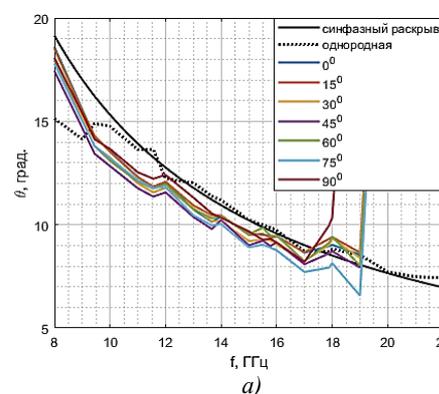


Рис. 11. Графики зависимости ширины ДН (а) и УБЛ (б) от частоты f при разном фокусном расстоянии

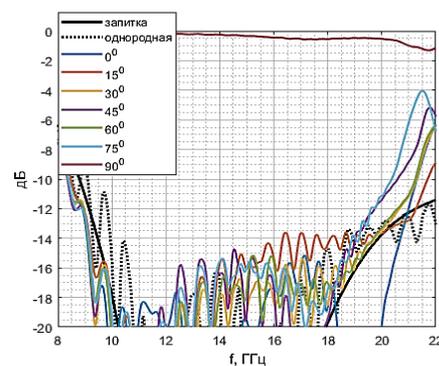


Рис. 12. Зависимость коэффициента отражения по входу от частоты f

На рис. 13 приведены ДН в Н-плоскости на частоте 10 ГГц для линзы из метаматериала при разном повороте облучателя, а также для линзы из однородного диэлектрика. На рис. 14 показаны объемные ДН рассматриваемых линз.

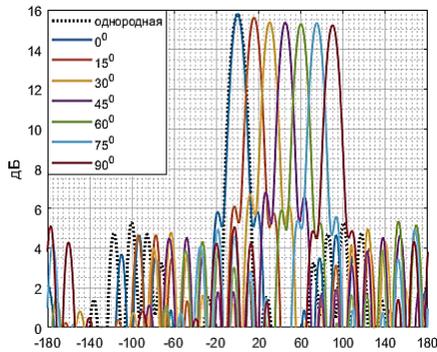


Рис. 13. Диаграмма направленности в Н-плоскости на частоте 10 ГГц при разном повороте облучателя

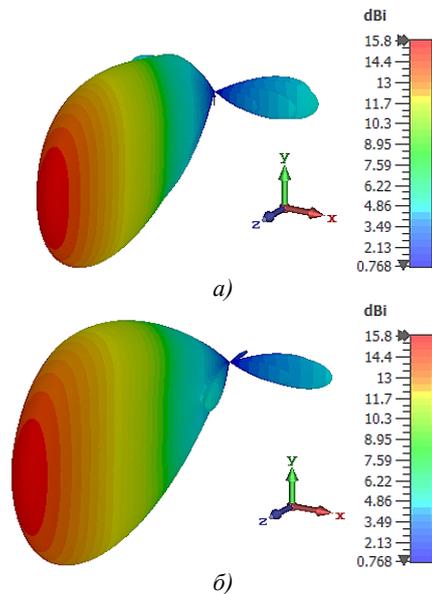


Рис. 14. Объемные ДН линзы из однородного диэлектрика (а) и метаматериала (б) на частоте 10 ГГц

Анализ полученных результатов показывает, что на частотах выше 18 ГГц у линзы из метаматериала разваливается ДН, т.е. снижается КНД до 10 дБи и КИП до 0.1 (см. рис. 10(а)), а ширина ДН становится в 3-4 раза больше ширины ДН синфазного равно-амплитудного раскрыва (см. рис. 11(а)), УБЛ возрастает до -4 дБи (см. рис. 11(б)). У линзы из однородного диэлектрика рабочая полоса составляет 8-24 ГГц. В диапазоне частот 10-16 ГГц:

- линзы из однородного диэлектрика и метаматериала имеют схожие КНД и КИП значения, т.е. КНД меньше на 1.5-2 дБи КНД синфазного равноамплитудного раскрыва, КИП в

обоих случаях убывает с ростом частоты (см. рис. 10);

- ширина ДН у линзы из однородного диэлектрика близка к ширине ДН синфазного равноамплитудного раскрыва – отличается в пределах 1^0 (см. рис. 11(а));

- ширина ДН у линзы из метаматериала на 1^0 - 3^0 уже ширины ДН синфазного равноамплитудного раскрыва (см. рис. 11(а));

- у линзы из однородного диэлектрика УБЛ на 1-2 дБи ниже, чем у линзы из метаматериала (см. рис. 11(б));

- линзы из однородного диэлектрика и метаматериала имеет схожий коэффициент отражения по входу ниже -15 дБ (см. рис. 12);

- исследуемые линзы имеют схожие ДН (см. рис. 13 и 14)

У линзы из метаматериала при повороте облучателя:

- снижаются КНД и КИП (см. рис. 10);

- ширина ДН остается примерно одинаковой (см. рис. 11(а));

- возрастает УБЛ и становится выше -10 дБи (см. рис. 11(б)) из-за наличия анизотропии у метаматериала;

- при повороте облучателя на 90^0 величина коэффициента отражения по входу близка к 1 (см. рис. 12).

Заключение

Изготовление однородной цилиндрической линзы возможно из последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала. При этом у линзы из однородного диэлектрика и метаматериала схожие направленные и частотные характеристики, но у линзы из метаматериала выше УБЛ и уже рабочая полоса. Фокусные расстояния исследуемых линз отличаются на 5 мм друг от друга.

Направлением дальнейших исследований является создание линз из неоднородного диэлектрика на основе последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала.

Литература

1. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи / А.В. Шишлов, Б.А. Левитан, С.А. Топчиев, В.Р. Анпилогов, В.В. Денисенко// Журнал радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 1-30.
2. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М.: Советское радио, 1974. 280 с.

3. Xin H., Liang M. 3D printed microwave and THz devices using polymer jetting techniques // *Proceedings of the IEEE*. 2017. № 4(105). Pp. 737-755.
4. 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.
5. W. Rotman, R. Turner Wide-angle microwave lens for line source applications // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1963. № 6(11). Pp. 623-632
6. Rappaport C.M., Zaghoul A.I. Multifocal Bootlace Lens Design Concepts: a Review // 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2005.
7. McGrath D. Planar three-dimensional constrained lenses // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986. № 1(34). Pp. 46-50.
8. Kaouach H., Dussopt L., Sauleau R. Modeling, Design and Demonstration for Discrete Lens Antenna with Circular –Polarization in the 60-GHz Band // *Int. J. of Res. in Wireless Syst.* 2012. № 1(1).
9. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1974. 536 с.
10. A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index / M. Choi, S.H. Lee, Y. Kim, B.S. Kang, J. Shin, M.H. Kwak, K.Y. Kang, Y.H. Lee, N. Park, B. Min // *Nature*. 2011. Vol.470. № 7334. Pp. 369-373.
11. Modified Luneburg Lens Based on Metamaterials / H. Chen, Q. Cheng, A. Huang, J. Dai, H. Lu // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2015. Vol. 2015. 6 p.
12. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous Metamaterials / D.R. Smith, D.C. Vier, T. Koschny, C.M. Soukoulis // *Physical Review. E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. 2005. Vol.71. №3.
13. A review of the scattering parameter extraction method with clarification of ambiguity issues in relation to metamaterial homogenization / S. Arslanagić, T.V. Hansen, N.A. Mortensen, A.H. Gregersen, O. Sigmund, R.W. Ziolkowski, O. Breinbjerg // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2013. Vol.55. №2. P. 91-106.
14. Szabó Z. Closed Form Kramers–Kronig Relations to Extract the Refractive Index of Metamaterials // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017. № 4(2017). Pp. 1150-1159.

Поступила 18.06.2020; принята к публикации 20.08.2020

Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14); Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а); АО «Иркос» (129626, Россия, г. Москва, а/я 30), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Рогозин Евгений Александрович – д-р техн. наук, профессор, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: evgenirogozin@yandex.ru

Рогозин Руслан Евгеньевич – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

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

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF ONE CYLINDRICAL LENS BASED ON PARALLEL PRINTED CIRCUIT BOARDS WITH ELECTRICALLY SMALL DIFFUSERS

Yu.G. Pasternak^{1,2,3}, E.A. Rogozin², R.E. Rogozin¹, S.M. Fedorov¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

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

³JSC «IRCOS», Moscow, Russia

Abstract: the possibility of creating a uniform cylindrical lens based on serially arranged printed circuit boards with applied periodic metamaterial structure was investigated. H-shaped structure located on dielectric substrate is used as cell of periodic structure of metamaterial. On the basis of the performed analysis of open literary and scientific-technical sources, the effect of the size of metal conductors of the H-shaped structure on the values of the actual part of the effective permittivity of the metamaterial is considered. Field distribution in azimuth plane is shown at normal fall of linearly polarized flat wave on lens surface from uniform dielectric and metamaterial. Directed characteristics of lens of irradiator with lens of uniform dielectric and metamaterial are considered for clarification of focal length. Conclusions are drawn on the value of focal distance. The directed and frequency characteristics of a lens from metamaterial at different turn of the irradiator concerning the center of a lens, a lens from uniform dielectric are investigated. Conclusions are drawn about similarity and difference of directional and frequency characteristics of two lenses, about influence of rotation of irradiator relative to lens center on characteristics of lens made of metamaterial. The results obtained in r-bot will be useful in designing lens antennas based on series-arranged printed circuit boards with applied periodic metamaterial structure

Key words: uniform cylindrical lens, metamaterial, directional and frequency characteristics

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. Zelkin E.G., Petrova R.A. "Lens antennas" ("Linzovye anteny"), Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 280 p.
3. Xin H., Liang M. "3D printed microwave and THz devices using polymer jetting techniques", *Proceedings of the IEEE*, 2017, vol. 105, no. 4, pp. 737-755.
4. 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.
5. Rotman W., Turner R. "Wide-angle microwave lens for line source applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1963, vol. 11, no. 6, pp. 623-632.
6. Rappaport C.M., Zaghloul A.I. "Multifocal bootlace lens design concepts: a review", *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2005.
7. McGrath D. "Planar three-dimensional constrained lenses", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34, no. 1, pp. 46-50.
8. Kaouach H., Dussopt L., Sauleau R. "Modeling, design and demonstration for discrete lens antenna with circular – polarization in the 60-GHz band", *Int. J. of Res. in Wireless Syst*, 2012, vol.1, no. 1.
9. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. "Antenna feeder devices" ("Antenno-fidernye ustroystva"), Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 536 p.
10. Choi M., Lee S.H., Kim Y., Kang B.S., Shin J., Kwak M.H., Kang K.Y., Lee Y.H., Park N., Min B. "A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index", *Nature*, 2011, vol. 470, no. 733, pp. 369-373.
11. Chen H., Cheng Q., Huang A., Dai J., Lu H. "Modified Luneburg lens based on metamaterials", *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, vol. 2015, 6 p.
12. Smith D.R., Vier D.C., Koschny T., Soukoulis C.M. "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous Metamaterials", *Physical Review. E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, vol.71, no. 3.
13. Arslanagić S., Hansen T.V., Mortensen N.A., Gregersen A.H., Sigmund O., Ziolkowski R.W., Breinbjerg O. "A review of the scattering parameter extraction method with clarification of ambiguity issues in relation to metamaterial homogenization", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2013, vol.55, no. 2, pp. 91-106.
14. Szabó Z. "Closed form Kramers–Kronig relations to extract the refractive index of metamaterials", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, vol. 2017, no. 4, pp. 1150-1159.

Submitted 18.06.2020; revised 20.08.2020

Information about the authors

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), Leading Engineer of JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), Senior Researcher, 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

Evgeniy A. Rogozin, Dr. Sc. (Technical), Professor, 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: evgeni-rogozin@yandex.ru

Ruslan E. Rogozin, Seeker, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: fedorov_sm@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ АНТЕННАМИ В МІМО АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ ДЛЯ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

С.А. Антипов, Е.А. Ищенко, В.Н. Кострова, К.А. Разинкин, Д.А. Стежкин, С.М. Фёдоров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена МІМО антенная решетка для сетей пятого поколения (5G), которая позволяет осуществлять работу в режиме 2x2. Для полученной конструкции исследованы основные характеристики МІМО антенной системы: коэффициент корреляции огибающей, коэффициент усиления при разнесенном режиме, эффективность сложения. Производилось исследование влияния расстояния между антенными элементами на данные показатели, по которым были сделаны выводы по выбору оптимального расстояния между излучателями в системе. Моделирование и расчет производились с использованием CST Studio Suite. Так, по полученным результатам доказано, что при расстоянии между элементами в 0.5 длины волны достигается максимальная производительность МІМО антенной решетки и последующее увеличение данного расстояния теряет смысл. При этом на частотах работы 5G было получено, что расстояние между элементами равное 0.2 длины волны обеспечивает требуемые значения коэффициента корреляции огибающей, чтобы обеспечить стабильное функционирование МІМО антенной решетки. Приведены изображения рассматриваемых конструкций, основные правила расчетов характеристик МІМО антенных решеток, построены графики коэффициентов корреляции, коэффициентов усиления при разнесенном приеме, эффективности сложения при разных значениях расстояния между элементами

Ключевые слова: МІМО антенная решетка, коэффициент корреляции огибающей, коэффициент усиления при разнесенном режиме, эффективность сложения, связь пятого поколения

Введение

Технология множественных входов, множественных выходов или МІМО набирает все большую популярность в современных высокопроизводительных стандартах связи. На основе системы МІМО построено множество современных высокотехнологичных стандартов связи, в которых данная технология является обязательной:

- 1) Wi-Fi 5 (802.11ac);
- 2) Wi-Fi 6 (802.11ax);
- 3) LTE-A;
- 4) 5G

Внедрение технологии 5G (IMT 2020) напрямую связано с МІМО, так как эта технология позволяет значительно улучшить пропускную способность канала связи, повысить стабильность, что особенно важно в частотных диапазонах, которые выделены для 5G. Поэтому разработка новых конструкций МІМО антенных решеток для сетей пятого поколения является важной задачей, так как требуется уместить большее число антенн в корпусе мобильного устройства.

Поэтому появляется задача уменьшения взаимного влияния антенн в системе при уменьшении расстояния между элементами.

Основные параметры МІМО антенной решетки

Для описания основных характеристик эффективности МІМО антенной решетки применяют три основных параметра, которые должны обеспечивать оптимальное функционирование системы в диапазоне рабочих частот, а также обеспечивать небольшой запас по параметрам, чтобы не оказывать влияния на другие антенные решетки, которые устанавливаются рядом.

Самой главной характеристикой МІМО антенной решетки является коэффициент корреляции огибающей (Envelope Correlation Coefficient (ECC)) [1], который можно рассчитать по двум формулам:

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)}, \quad (1)$$

где ρ_e – коэффициент корреляции МІМО;

S_{mn} – S - параметры двух антенн;

* – обозначает взятие комплексно-сопряженного числа.

Недостатком формулы (1) является то, что ее возможно применять в ситуациях, когда КПД антенн превышает 90% (>-1 дБ), однако типичные мобильные антенны, изготовленные по планарной технологии, имеют КПД около 70%, что делает применение данной формулы

невозможным, в таких случаях используют следующее выражение:

$$\rho_e = \frac{\left| \iint \vec{F}_1(\theta, \varphi) \cdot \vec{F}_2^*(\theta, \varphi) d\Omega \right|^2}{\iint |\vec{F}_1(\theta, \varphi)|^2 d\Omega \cdot \iint |\vec{F}_2(\theta, \varphi)|^2 d\Omega}, \quad (2)$$

где ρ_e – коэффициент корреляции ММО;

$\vec{F}_n(\theta, \varphi)$ – диаграмма направленности антенны;
* – обозначает взятие комплексно-сопряженного числа.

Коэффициент корреляции огибающей желательнее свести к минимуму, тогда ММО антенная решетка будет работать оптимально. Для улучшения данного показателя можно предложить три метода:

- 1) увеличить расстояние между антенными элементами;
- 2) изменить тип поляризации одного из излучателей;
- 3) отрегулировать направление главного лепестка антенны.

На основе рассчитанного коэффициента корреляции можно рассчитать оставшиеся параметры ММО антенной решетки. Следующим важным параметром антенной системы является коэффициент усиления при разнесенном режиме (Diversity Gain (DG)), максимальное значение которого, равное 10, достигается при наиболее оптимальном расположении антенн друг относительно друга. Коэффициент усиления при разнесенном режиме можно найти в соответствии с формулой:

$$DG = 10 \cdot \sqrt{1 - \rho_e}, \quad (3)$$

где DG – коэффициент усиления при разнесенном режиме;

ρ_e – коэффициент корреляции огибающей, может быть рассчитан в соответствии с (1) или (2).

Как видно по формуле (3), коэффициент усиления при разнесенном режиме напрямую связан с коэффициентом корреляции огибающей, который в лучшем случае имеет значение равное 0, а, соответственно, значение DG в идеальной ситуации ограничено 10.

Следующим важным параметром ММО антенной решетки является эффективность сложения (Multiplexing Efficiency) [2], которая определяет, насколько эффективно принятые сигналы могут быть объединены в антенной системе для последующей обработки. Данный показатель эффективности ММО антенной решетки может быть рассчитан в соответствии с формулой:

$$ME = \sqrt{\eta_1 \eta_2 (1 - \rho_e)}, \quad (4)$$

где ME – эффективность сложения, как правило, график данного параметра строится в дБ шкале;

η_n – КПД n-й антенны;

ρ_e – коэффициент корреляции огибающей, может быть рассчитан в соответствии с (1) или (2).

Таким образом, в идеальном режиме работы ММО антенной решетки, а также при наличии идеальных антенн со 100% КПД значение эффективности сложения составит 1 или 0 дБ. Данный параметр должен иметь максимальное значение на частоте резонанса антенны.

Определение влияния расстояния между антеннами на основные параметры ММО антенной решетки

Для системы связи 5G FCC выделила три основных частотных диапазона: 28 ГГц, 37 ГГц, 39 ГГц. Для построения ММО антенной решетки была выбрана система, состоящая из двух микрополосковых патч-антенн, подробный расчет и анализ которой выполнялся в [3]. Модель такого излучателя приведена на рис. 1, а основные геометрические параметры в табл. 1.

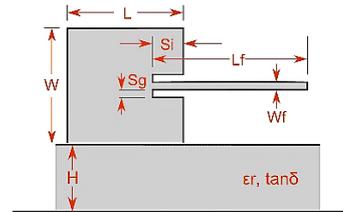


Рис. 1. Модель антенны с указанием параметров

Таблица 1

Размеры патч-антенны						
L , мм	W , мм	W_f , мкм	L_f , мм	H , мкм	S_i , мкм	S_g , мкм
2.259	2.834	364.5	2.578	145	783	101.2

Для определения влияния расстояния между излучателями на характеристики ММО системы рассмотрим 5 случаев:

- 1) Расстояние между излучателями 0.02λ ;
- 2) Расстояние между излучателями 0.07λ ;
- 3) Расстояние между излучателями 0.2λ ;
- 4) Расстояние между излучателями 0.5λ ;
- 5) Расстояние между излучателями 1λ ,

где λ – длина волны на рабочей частоте, которая для рассматриваемого случая равна:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{37 \cdot 10^9 \text{ Гц}} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (5)$$

где c – скорость света;

f – рабочая частота антенны.

На основе этих данных были сформированы 5 ММО антенных решеток с соответствующим расстоянием между антеннами рис. 2-6.

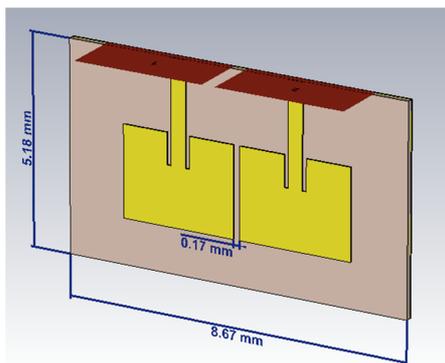


Рис. 2. Модель ММО антенной решетки с расстоянием между излучателями в 0.17 мм (0.02λ)

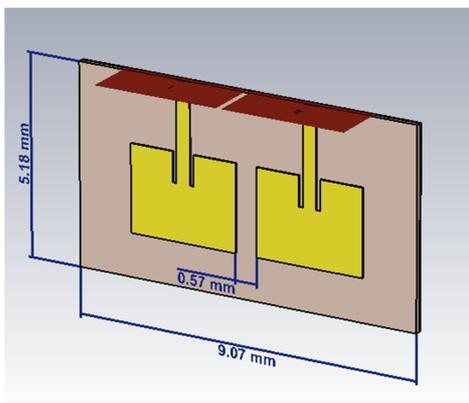


Рис. 3. Модель ММО антенной решетки с расстоянием между излучателями в 0.57 мм (0.07λ)

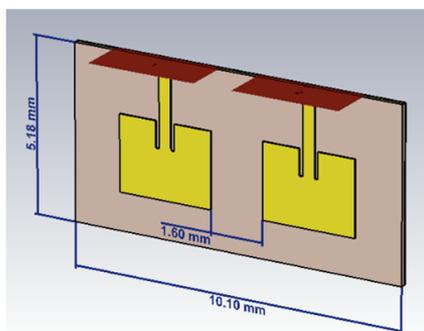


Рис. 4. Модель ММО антенной решетки с расстоянием между излучателями в 1.6 мм (0.2λ)

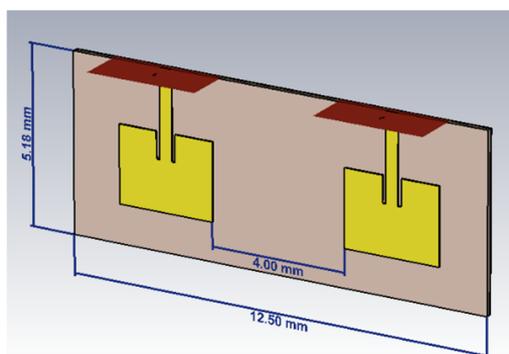


Рис. 5. Модель ММО антенной решетки с расстоянием между излучателями в 4 мм (0.5λ)

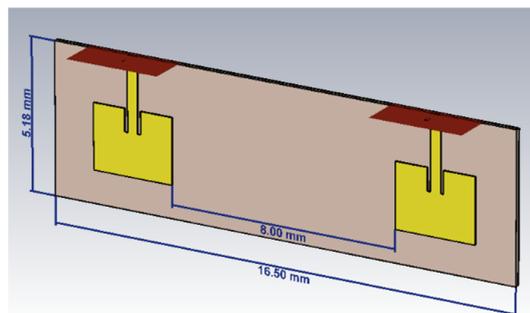


Рис. 6. Модель ММО антенной решетки с расстоянием между излучателями в 8 мм (1λ)

По полученным результатам моделирования КПД такого антенного элемента составляет 67%, соответственно для определения коэффициента корреляции огибающей нельзя использовать формулу (1), а следовательно расчет производится на основе диаграмм направленности по формуле (2). Для того чтобы рассчитать требуемые характеристики ММО антенной решетки, можно воспользоваться встроенными шаблонами обработки результатов в CST Studio Suite.

По полученным результатам коэффициент корреляции для рассмотренных моделей антенных решеток приведен на рис. 7, для его измерения был выбран диапазон частот от 20 до 55 ГГц, диаграммы направленности строились с шагом в 1 ГГц.

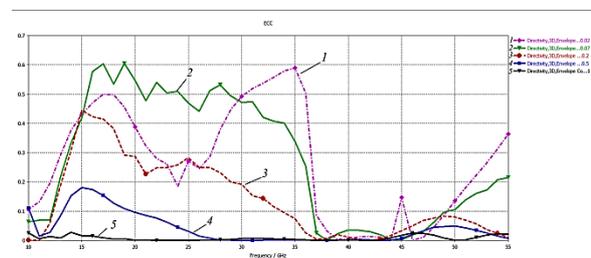


Рис. 7. Коэффициент корреляции ММО антенной решетки: 1 – 0.02λ ; 2 – 0.07λ ; 3 – 0.2λ ; 4 – 0.5λ ; 5 – 1λ

Так, известно, что оптимальным значением коэффициента корреляции для ММО антенной решетки являются значения ниже 0.3, а при превышении 0.5 нарушается работа антенной системы. При расстоянии между элементами менее 0.1λ коэффициент корреляции начинает превышать уровень в 0.3.

Рассчитаем и построим для частот от 20 до 55 ГГц коэффициент усиления при разнесенном режиме, полученные графики приведены на рис. 8.

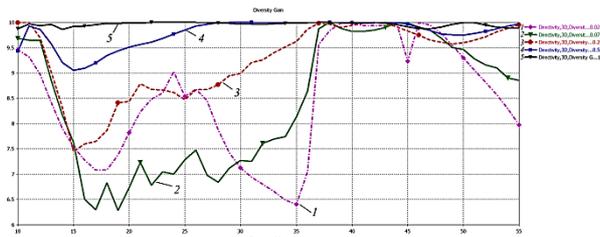


Рис. 8. Коэффициент усиления при разнесенном режиме: 1 – 0.02λ; 2 – 0.07λ; 3 – 0.2λ; 4 – 0.5λ; 5 – 1λ

По полученной зависимости видно, что наихудшие значения DG принимает при близко расположенных антенных элементах на расстоянии менее 0.1λ.

При построении эффективности сложения МИМО антенной решетки (ME) (рис. 9) будем рассматривать частотный диапазон от 20 до 50 ГГц, причем полученный график построен в дБ масштабе:

$$ME(dB) = 10 \lg(\sqrt{\eta_1 \eta_2 (1 - \rho_e)}). \quad (6)$$

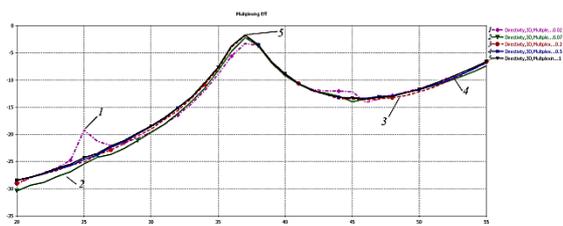


Рис. 9. Эффективность сложения МИМО антенной решетки: 1 – 0.02λ; 2 – 0.07λ; 3 – 0.2λ; 4 – 0.5λ; 5 – 1λ

Как видно по полученным зависимостям, эффективность сложения всех вариантов расположения антенных элементов приблизительно одинакова в широком диапазоне частот.

Сведем все полученные результаты в общую табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования МИМО антенной решетки для сетей 5G

Расстояние между элементами, λ	ЕСС, 37 ГГц	ЕСС макс.	DG, 37 ГГц	DG мин.	ME, 37 ГГц
0.02	0.0856	0.59 (35ГГц)	9.56	6.40 (35ГГц)	-3.3
0.07	0.0249	0.55 (20ГГц)	9.87	6.73 (20ГГц)	-2.2

Продолжение табл. 2

0.2	0.0041	0.29 (20ГГц)	9.98	8.44 (20ГГц)	-1.8
0.5	0.0012	0.96 (20ГГц)	9.99	9.51 (20ГГц)	-1.7
1	0.0005	0.025 (46ГГц)	9.99	9.87 (46ГГц)	-1.7

По полученным результатам видно, что расстояние равное 0.2λ между антенными элементами в МИМО антенной решетке достаточно для обеспечения стабильной работы системы, а также при увеличении расстояния между элементами после 0.5λ не приносит какого-либо значительного выигрыша, а, соответственно, при разнесении на полдлины волны уже достигаются максимально возможные показатели антенной решетки.

Заключение

В процессе моделирования рассматривалась ситуация, когда функционирование МИМО антенной решетки осуществлялось в режиме 2x2, однако для сетей 5G также применяется система 4x4, и при ее формировании антенные элементы помещаются в одну линию с одинаковым расстоянием и, соответственно, наибольший интерес представляют именно два рядом расположенных элемента, как и было рассмотрено в данной статье.

По полученным результатам видно, что оптимальные значения основных параметров МИМО антенной решетки могут быть достигнуты уже при расстоянии между элементами в 0.2λ, а максимальная производительность системы достигается уже при 0.5λ.

Литература

1. 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.
2. Tian R., Lau B.K., Ying Z. Multiplexing Efficiency of MIMO Antennas // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2011. V. 10. pp. 183-186.
3. Исследование влияния длины патч-излучателя на его характеристики / С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, М.А. Сиваш, И.А. Зеленин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 2. С. 113-120.

Поступила 18.06.2020; принята к публикации 20.08.2020

Информация об авторах

Антипов Сергей Анатольевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)246-27-00, e-mail: antp54@mail.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Кострова Вера Николаевна – д-р техн. наук, профессор кафедры систем информационной безопасности, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-04, e-mail: kostrova_v@mail.ru

Разинкин Константин Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kostyr@mail.ru

Стежкин Дмитрий Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: stezhkin2012@mail.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DISTANCE BETWEEN ANTENNAS IN MIMO ANTENNA ARRAY FOR FIFTH GENERATION COMMUNICATIONS

S.A. Antipov, E.A. Ishchenko, V.N. Kostrova, K.A. Razinkin, D.A. Stezhkin, S.M. Fyedorov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the MIMO antenna array for fifth generation networks (5G), which allows one to work in 2×2 mode. For the design obtained, the main characteristics of the MIMO antenna system were studied: envelope correlation coefficient, diversity gain, and multiplexing efficiency. A study was made of the influence of the distance between the antenna elements on these indicators, according to which conclusions were drawn on choosing the optimal distance between the emitters in the system. Modeling and calculation were carried out using CST Studio Suite. Thus, according to the results obtained, it is proved that when the distance between the elements is 0.5 wavelengths, the maximum MIMO performance of the antenna array is achieved and a subsequent increase in this distance loses its meaning. At the same time, at frequencies of 5G, it was found that the distance between the elements equal to 0.2 wavelength provides the required values of the envelope correlation coefficient to ensure stable operation of the MIMO antenna array. The article presents the images of the structures under consideration, the basic rules for calculating the characteristics of MIMO antenna arrays, graphs of correlation coefficients, gain factors for diversity reception and multiplexing efficiency for different values of the distance between elements are constructed

Key words: MIMO antenna array, envelope correlation coefficient, diversity gain, multiplexing efficiency, fifth generation communications

References

1. 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.
2. Tian R., Lau B.K., Ying Z. "Multiplexing efficiency of MIMO antennas", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, vol. 10, pp. 183-186
3. Fedorov S.M., Ishchenko E.A., Sivash M.A., Zelenin I.A. "Investigation of the effect of the patch emitter length of its characteristics", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 2, pp 113-120.

Submitted 18.06.2020; revised 20.08.2020

Information about the authors

Sergey A. Antipov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: antp54@mail.ru

Evgeniy A. Ishchenko, student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Vera N. Kostrova, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kostrova_v@mail.ru

Konstantin A. Razinkin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kostyr@mail.ru

Dmitriy A. Stezhkin, student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: stezhkin2012@mail.ru

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОДА НА БАЗЕ ПЛИС

А.А. Пирогов¹, Ю.А. Пирогова¹, С.А. Гвозденко¹, Б.И. Жилин², Э.В. Сёмка²¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

Аннотация: сложение чисел в двоичном коде осуществляется по тем же правилам, как и при десятичной кодировке. Независимо от кодировки сложение идет с младшего разряда числа. При переполнении, когда результат сложения значений одноименных разрядов больше единицы, делается перенос в следующий старший разряд и происходит сложение со значением данного разряда. Вычитание чисел в двоичном коде также аналогично операции вычитания в десятичной кодировке. В данном случае, если значение разряда вычитаемого больше соответствующего разряда значения уменьшаемого числа, берется заем из следующего старшего разряда. Поэтому реализация вычитания в ЭВМ является более трудоемкой, чем формирование переноса, возникающего при сложении. В вычислительных системах вычитание заменяют операцией сложения отрицательных чисел, представленных в форме обратного или дополнительного кода. В этом случае для знака выделяется дополнительный разряд, являющийся самым старшим разрядом разрядной сетки представленного двоичного числа (знаковый разряд). Для положительного числа знаковый разряд равен нулю, а для отрицательного равен единице. Прямой код является естественным представлением двоичного числа в двоичной системе счисления. Сложение чисел с одинаковыми знаками в прямом коде выполняется по обычным правилам

Ключевые слова: двоичный код, обратный код, дополнительный код, моделирование

Введение

Данные в вычислительных системах обрабатываются с применением различных систем кодирования, используя широкую номенклатуру преобразователей кода. Актуальность реализации преобразователей кода на ПЛИС обусловлена возможностью получения гибкой программируемой архитектуры с изменяемыми параметрами кодировки.

Операцию вычитания можно свести к операции сложения при использовании обратных и дополнительных кодов. Форма обратного и дополнительного кода положительного числа равна соответствующему прямому коду. Форма обратного кода отрицательного числа системы счисления с основанием k получается, если в качестве цифры его разряда взять разность между максимальной цифрой данной системы счисления ($k-1$) и цифрой кода того же разряда. В соответствии с этим правилом для отрицательных двоичных чисел в разрядах единицы следует заменить нулями, а нули – единицами, при этом в знаковом разряде появляется единица (признак отрицательного числа). Ноль в прямом и обратном коде не однозначен, имеет два представления. Положительная сумма будет представлена прямым кодом, а отрицательная обратным. Для пере-

хода в прямой код при преобразовании обратного кода отрицательного числа бит знака не меняется и производится инверсия разрядов числа [1].

Существенным недостатком алгебраического сложения в обратных кодах является наличие циклического переноса (от сложения знаковых разрядов), возникающего при положительном результате сложения. При возникновении единицы переноса и знакового разряда для получения окончательного результата необходимо единицу переноса прибавить к младшему разряду результата сложения обратных кодов. Этого недостатка лишен способ сложения в дополнительных кодах. Дополнительный код отрицательного числа получается вычитанием прямого кода из числа, состоящего из единицы и столько же нулей, сколько цифр в прямом коде. Тот же результат получим, если к обратному коду прибавить единицу. Чтобы получить число в дополнительном коде, можно воспользоваться более простым способом. Просматривают разряды числа справа (от младшего разряда) налево до первого бита, равного единице. При этом нули числа до первого значащего бита и единица первого значащего бита остаются без изменений. Каждый последующий бит числа в коде меняется на противоположный.

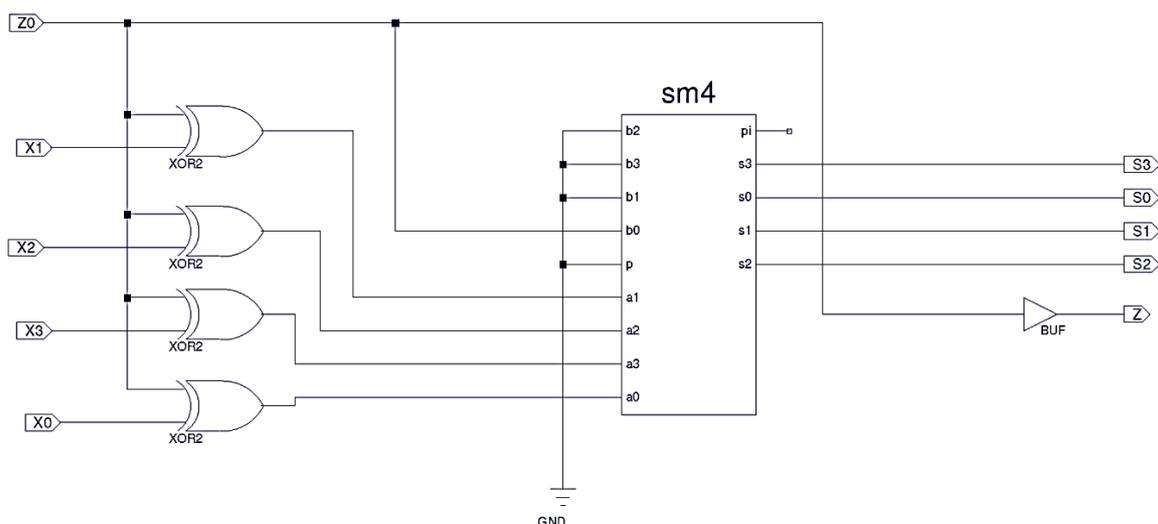


Рис. 1. Схема преобразователь прямого двоичного кода в дополнительный код

Проектирование преобразователя прямого двоичного кода в дополнительный код

Таблица 1

Таблица прямого и дополнительно двоичного кода

Ниже представлена сводная таблица прямого и дополнительного двоичного кода. Столбцы Z_0 и Z это старшие биты разрядной сетки числа в прямом и дополнительном коде, указывающие на его знак («0» - число положительное, «1» - число отрицательное).

Преобразователь в дополнительный код представляет собой четырехразрядный сумматор и элементы, исключаящие «или» (XOR), подключенные на каждый разряд входного прямого кода. В случае, когда число на входе положительное, на входе Z_0 формируется уровень логического нуля, в результате исходное число подается без изменений на входы a_i сумматора, при этом на вход b_0 сумматора также поступает ноль, с которым происходит сложение числа. В результате на выходах преобразователя S_i получаем дополнительный код числа, равный исходному коду. При подаче на вход Z_0 единицы элементы XOR инвертируют исходный код, к младшему разряду которого добавляется единица с входа b_0 , что позволяет сформировать дополнительный код отрицательного числа на выходах преобразователя [2].

Схема преобразователь прямого двоичного кода в дополнительный представлен на рис. 1.

№	Прямой код						Дополнительный код			
	Z_0	X_3	X_2	X_1	X_0	Z	S_3	S_2	S_1	S^0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
4	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
6	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
7	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
8	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
9	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
10	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
11	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
12	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
13	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1
14	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0
15	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
16	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
17	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
18	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0
19	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1
20	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
21	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1
22	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0
23	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1
24	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
25	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
26	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0
27	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
28	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0
29	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
30	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0
31	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1

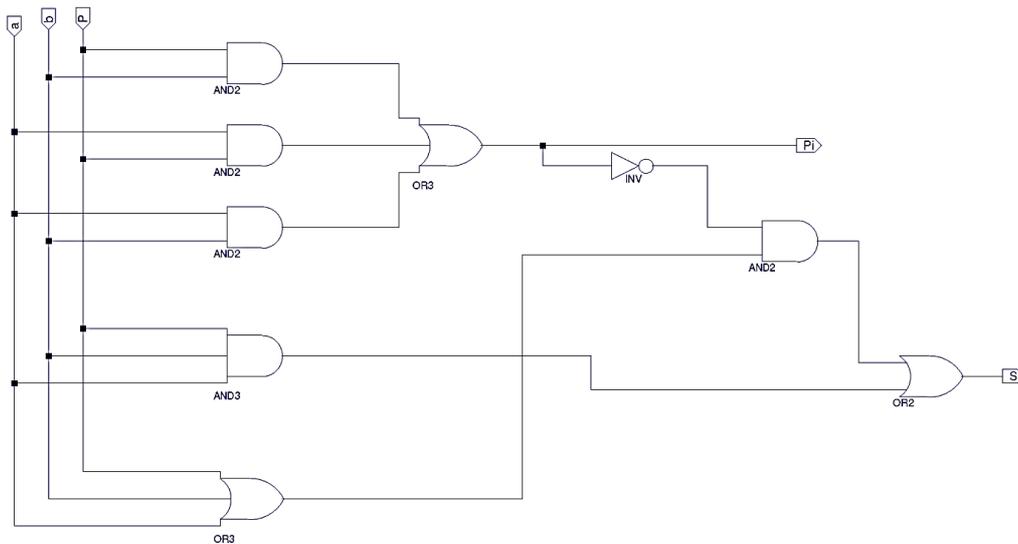


Рис. 2. Схема одноразрядного двоичного сумматора

Используемый четырехразрядный сумматор представляет собой каскадную схему одноразрядных сумматоров. Ниже представлена таблица истинности полного одноразрядного сумматора.

Таблица 2

Таблица истинности для полного одноразрядного сумматора

№	a _i	b _i	P _i	S _i	P _{i+1}
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0
2	0	1	0	1	0
3	0	1	1	0	1
4	1	0	0	1	0
5	1	0	1	0	1
6	1	1	0	0	1
7	1	1	1	1	1

Для полного двоичного сумматора характерны следующие переключательные функции (ПФ):

$$S_i = \overline{a_i} \overline{b_i} p_i + \overline{a_i} b_i \overline{p_i} + a_i \overline{b_i} \overline{p_i} + a_i b_i p_i, \quad (1)$$

$$p_{i+1} = \overline{a_i} b_i p_i + a_i \overline{b_i} p_i + a_i b_i \overline{p_i} + a_i b_i p_i$$

где a_i и b_i – складываемые кодовые комбинации, P_i – вход переноса, S_i – значение суммы, P_{i+1} (C_i) – выход переноса.

Далее выполним минимизацию ПФ, получим следующие выражения для функции суммы S_i и функции переноса P_{i+1}:

$$P_{i+1} = \overline{a_i} b_i p_i + a_i \overline{b_i} p_i + a_i b_i \overline{p_i} + a_i b_i p_i + a_i b_i p_i + a_i b_i p_i =$$

$$= b_i p_i + a_i p_i + a_i b_i \quad (2)$$

$$S_i = \overline{a_i} \overline{b_i} p_i + \overline{a_i} b_i \overline{p_i} + a_i \overline{b_i} \overline{p_i} + a_i b_i p_i = \overline{a_i} \overline{b_i} p_i \cdot \overline{a_i} \overline{b_i} \overline{p_i} \cdot \overline{a_i} \overline{b_i} \overline{p_i} + a_i b_i p_i =$$

$$= (\overline{a_i} + \overline{b_i} + \overline{p_i}) \cdot (a_i + b_i + p_i) \cdot (\overline{a_i} + b_i + p_i) + a_i b_i p_i =$$

$$= (\overline{a_i} + a_i \overline{b_i} + a_i p_i + a_i b_i + b_i p_i + a_i \overline{p_i} + b_i p_i) \cdot (\overline{a_i} + b_i + p_i) + a_i b_i p_i =$$

$$= b_i p_i + a_i b_i + a_i p_i + \overline{a_i} \overline{b_i} p_i + a_i b_i p_i = \overline{p_{i+1}} \cdot (a_i + b_i + p_i) + a_i b_i p_i \quad (3)$$

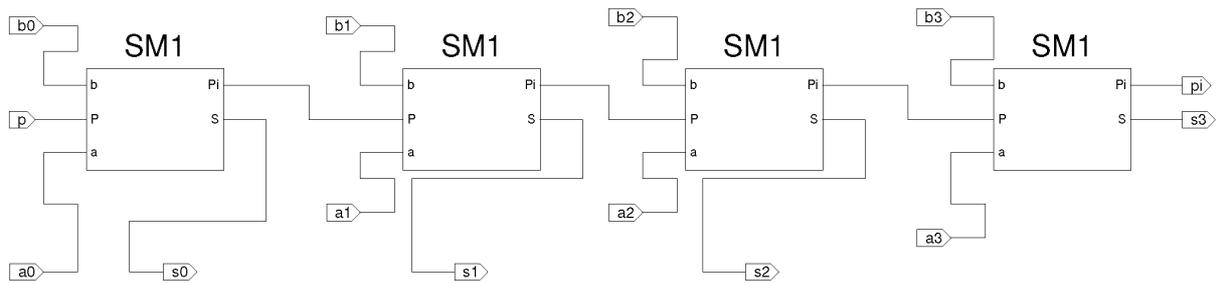


Рис. 3. Схема четырехразрядного двоичного сумматора

Схема одноразрядного двоичного сумматора, построенная на основе полученных ПФ, представлена на рис. 2. На рис. 3 представлена схема каскадного четырехразрядного двоичного сумматора.

Далее проведем моделирование преобразователя прямого двоичного кода в дополни-

тельный код и получим временную диаграмму, представленную на рис. 4. Полученная временная диаграмма отражает работу преобразователя, полученные результаты соответствуют таблице прямого и дополнительно двоичного кода, приведенной выше [3].

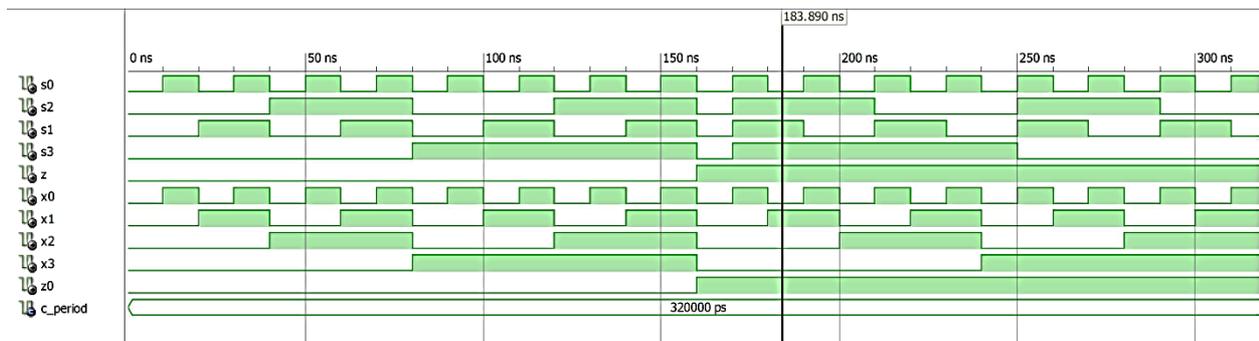


Рис. 4. Временная диаграмма работы преобразователя прямого двоичного кода в дополнительный код

Проектирование преобразователя прямого двоичного кода в обратный код

Обратный двоичный код образуется путем инверсии значимых разрядов двоичного числа.

Схема преобразователя прямого двоичного кода в дополнительный представлена на рис. 5.

Далее проведем моделирование преобразователя прямого двоичного кода в обратный код и получим временную диаграмму, представленную на рис. 6. Полученная временная диаграмма отражает работу преобразователя, полученные результаты соответствуют таблице прямого и обратного двоичного кода.

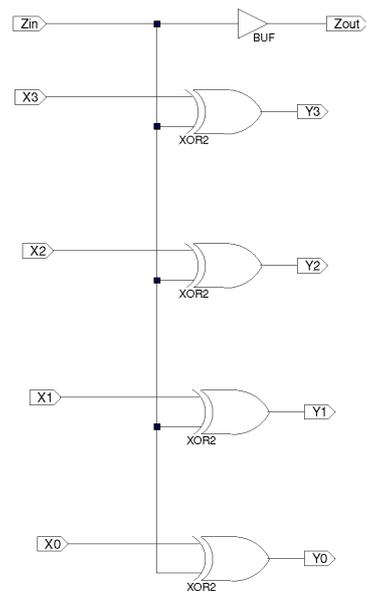


Рис. 5. Преобразователь прямого двоичного кода в обратный код

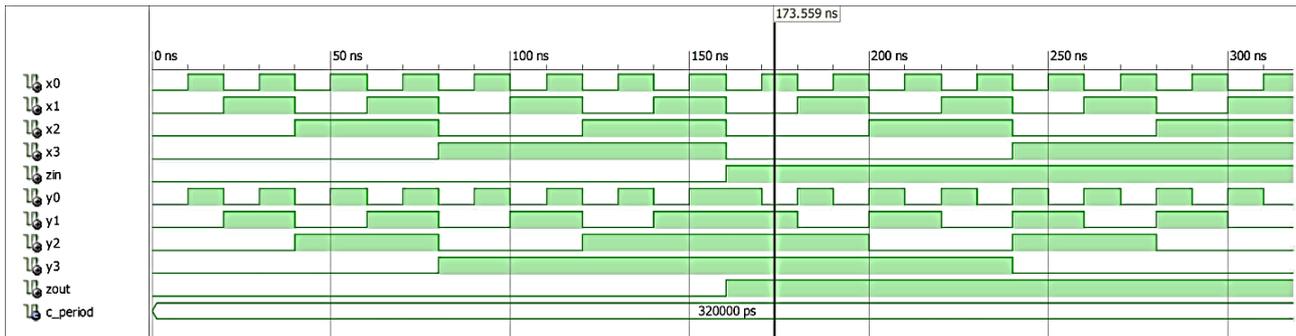


Рис. 6. Временная диаграмма работы преобразователя прямого двоичного кода в обратный код

Таблица 3

Таблица прямого и обратного двоичного кода

№	Прямой код					Дополнительный код				
	Z0	X3	X2	X1	X0	Z	S3	S2	S1	S0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
4	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
6	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
7	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1
8	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
9	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
10	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0
11	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1
12	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
13	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1
14	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0
15	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
16	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
17	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0
18	1	0	0	1	0	1	1	1	0	1
19	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0
20	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
21	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
22	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1
23	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0
24	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1
25	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0
26	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
27	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0
28	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1
29	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0
30	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1
31	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Реализация полученных моделей преобразователей выполнена на базе ПЛИС, которые представляют собой программно конфигурируемые интегральные схемы. При разработке сложных устройств могут применяться в качестве компонентов для проектирования готовые сложно-функциональные блоки (СФ-блоки).

Использование программных СФ-блоков позволяет наиболее эффективно задействовать их в конечной структуре, в значительной степени сократить затраты на проектирование.

Заключение

В итоге получены модели преобразователей в полном базисе. Построение моделей было проведено с применением специализированного программного продукта Xilinx ISE при помощи интегрированного схемного редактора. Полученные результаты могут найти применение в реконфигурируемых системах, построенных на базе ПЛИС, и в структурах СФ-блоков. Блок имеет открытую архитектуру, что позволяет адаптировать его в системе под требуемую задачу. Также за счет низкого числа задействованных вентилях есть возможность наращивания структуры, увеличения разрядности преобразуемых кодов.

Литература

1. Методика получения поведенческой модели для оценки отклонения значащих моментов цифрового сигнала от идеальных положений во времени / М.Ю. Чепелев, А.А. Пирогов, А.В. Башкиров, И.А. Бурмистров // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2019. № 2. С. 14-25.
2. Башкиров А.В., Свиридова И.В., Андреева Д.С. Эффективная архитектура на основе ПЛИС для полностью параллельного стохастического LDPC-декодера // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 101-107.
3. Башкиров А.В., Свиридова И.В. Реализация стохастического LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 103-107.

Поступила 10.06.2020; принята к публикации 20.08.2020

Информация об авторах

Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Пирогова Юлия Александровна – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: gvendilon@mail.ru

Гвозденко Сергей Анатольевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: jgsar@mail.ru

Жилин Борис Иванович – канд. техн. наук, старший преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54 «А»), e-mail: borishms@mail.ru

Сёмка Элеонора Викторовна – преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых большевиков, 54 «А»), e-mail: semka_elya@mail.ru

DESIGN METHODOLOGY FOR CODE CONVERTERS BASED ON FPGA

A.A. Pirogov¹, Yu.A. Pirogova¹, S.A. Gvozdenko¹, B.I. Zhilin², E.V. Syemka²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

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

Abstract: addition of numbers in binary code is carried out according to the same rules as with decimal encoding. Regardless of the encoding, addition comes from the low order of the number. During overflow, when the result of adding the values of the same categories is more than one, a transfer is made to the next senior level and addition occurs with the value of this category. Subtraction of numbers in binary code is also similar to the operation of subtraction in decimal coding. In this case, if the value of the digit subtracted is greater than the corresponding digit of the value of the decreasing number, a borrow is taken from the next high-order digit. Therefore, the implementation of the subtraction in a computer is more time-consuming than the formation of the transfer arising during addition. In computing systems, subtraction is replaced by the operation of adding negative numbers, presented in the form of a reverse or additional code. In this case, an extra bit is allocated for the sign, which is the highest bit of the bit grid of the represented binary number (sign bit). For a positive number, the sign digit is zero, and for a negative one. Direct code is a natural representation of a binary number in a binary number system. Adding numbers with the same signs in the direct code is performed according to the usual rules

Key words: binary code, reverse code, additional code, modeling

References

1. Chepelev M.Yu., Pirogov A.A., Bashkirov A.V., Burmistrov I.A. “Methodology for obtaining a behavioral model for assessing the deviation of significant moments of a digital signal from ideal positions in time”, *Bulletin of Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii)*, 2019, no. 2, pp. 14-25.
2. Bashkirov A.V., Sviridova I.V., Andreeva D.S. “Effective FPGA-based architecture for a fully parallel stochastic LDPC decoder”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 101-107.
3. Bashkirov A.V., Sviridova I.V. “Implementation of the stochastic LDPC decoder on the FPGA”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 6, pp. 103-107

Submitted 10.06.2020; revised 20.08.2020

Information about the authors

Aleksandr A. Pirogov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Yuliya A. Pirogova, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: gvendilon@mail.ru

Sergey A. Gvozdenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: jgsar@mail.ru

Boris I. Zhilin, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, 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: borishms@mail.ru

Eleonora V. Syemka, Assistant Professor, 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: semka_elya@mail.ru

**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ**

И.П. Бостынец, В.И. Лопин, А.А. Рогозин, Г.Л. Тюрин

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

Аннотация: статья посвящена перспективам применения гиперспектральной аппаратуры, устанавливаемой на космических, воздушных и наземных носителях. Приведены состав, основные технические характеристики и возможности современной и перспективной гиперспектральной аппаратуры, обеспечивающей обнаружение и распознавание различных объектов. Рассмотрены существующие схемы построения гиперспектральной аппаратуры, выполненные на базе акустооптических и жидкокристаллических фильтров, интерферометров и диспергирующих элементов, а также применяемые на практике способы сканирования наблюдаемой фоно-целевой обстановки. Представлен краткий анализ существующего методического обеспечения для обнаружения и распознавания объектов на основе обработки полученных с помощью гиперспектральной аппаратуры данных, а также перечислены основные задачи, решаемые с помощью данной аппаратуры. Отмечены основные проблемы, возникающие при обработке гиперспектральных данных, а также методы и способы их решения. Приведены результаты анализа технических возможностей существующих образцов гиперспектральной аппаратуры. Показано, что использование современных методов обработки информации, поступающей от гиперспектральной аппаратуры, позволяет решать практические задачи, связанные с мониторингом окружающей среды, обнаружением и идентификацией малоразмерных объектов, селекцией ложных целей, определением различий между близкими классами объектов, оценкой их биохимических и геофизических параметров

Ключевые слова: гиперспектральная аппаратура, спектральное разрешение, обнаружение, распознавание

Введение

В условиях развития современных технологий существенным образом выросли информационные возможности оптико-электронных средств по обнаружению и распознаванию различных естественных и антропогенных объектов. Одним из качественно новых видов оптико-электронных средств является гиперспектральная (ГС) аппаратура, обеспечивающая получение изображений фоно-целевой обстановки (ФЦО) с высоким пространственным и спектральным разрешением. В результате применения данной аппаратуры формируется пространственно-спектральное изображение, так называемый «гиперкуб», схема и принцип формирования которого приведены на рис. 1.

Такой «гиперкуб» можно интерпретировать как совокупность изображений поверхности ФЦО для каждого из спектральных каналов, где отдельно взятое изображение представляет собой распределение элементарной спектральной яркости по площади кадра. Формирование «гиперкуба» осуществляется, как правило, путем разложения в спектр оптического излучения от ФЦО с помощью диспергирующих элементов, в качестве которых могут

быть использованы либо оптические призмы, либо дифракционные решетки. Полученный «гиперкуб» содержит уникальную информацию, характеризующую детальные спектральные различия между соседними пикселями изображения ФЦО.

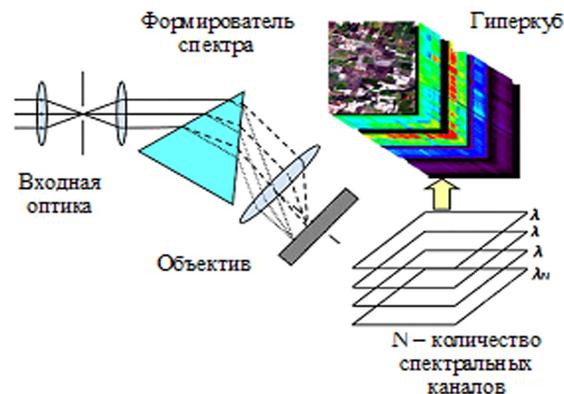


Рис. 1. Схема и принцип формирования спектрально-пространственного изображения ФЦО ГС аппаратурой

**Возможности современной
гиперспектральной аппаратуры**

Существующая ГС аппаратура отличается применяемым способом сканирования наблюдаемой ФЦО. Как правило, выделяют три ос-

новых способа: линейное, поперечное и продольное сканирование [1].

Линейное сканирование (рис. 2а) применяется, когда приемником регистрируемого излучения является линейка фотоприемников. В данном случае сканирование пространства производится элементарным полем зрения – поперек маршрута за счет сканирующего зеркала, а вдоль маршрута – за счет движения носителя аппаратуры. При этом для каждого зарегистрированного кадра происходит разложение принятого оптического излучения ФЦО с помощью диспергирующего элемента по длине волны и регистрация его элементами линейки фотоприемников.

В случае реализации поперечного или продольного сканирования приемником регистрируемого оптического излучения является матрица фотоприемников.

При поперечном сканировании (рис. 2б) поле зрения, соответствующее одной строке фотоприемной матрицы, фиксируется вдоль интересующей области сцены с помощью гиостабилизированной платформы, а по второму измерению матрицы регистрируется спектральная информация. Сканирование пространства осуществляется поперек движения носителя ГС аппаратуры с помощью сканирующего зеркала.

При продольном сканировании (рис. 2в) поле зрения, соответствующее одной строке матрицы, располагается поперек движения носителя аппаратуры, то есть перпендикулярно направлению сканирования. Спектральная информация регистрируется по второму измерению фотоприемной матрицы. Разложение оптического излучения по спектру для всех трех видов сканирования может быть выполнено на дифракционной решетке, призме или их комбинации.

Наиболее широко при построении ГС аппаратуры космического и воздушного базирования используется продольное сканирование наблюдаемой сцены, поскольку при этом отпадает необходимость в дополнительном сканирующем устройстве, использование которого приводило бы к уменьшению светосилы оптической части аппаратуры. Развертка изображения по пространству осуществляется «естественным» сканированием при движении авиационного или космического носителя. Такая схема проста в реализации, не имеет движущихся механических узлов, а следовательно, обладает высокой надежностью. В случае наземного базирования ГС аппаратуры не тре-

буется компенсировать сложную траекторную схему ее работы, но для обеспечения развертки изображения по пространству в ее состав включается сканирующее устройство.

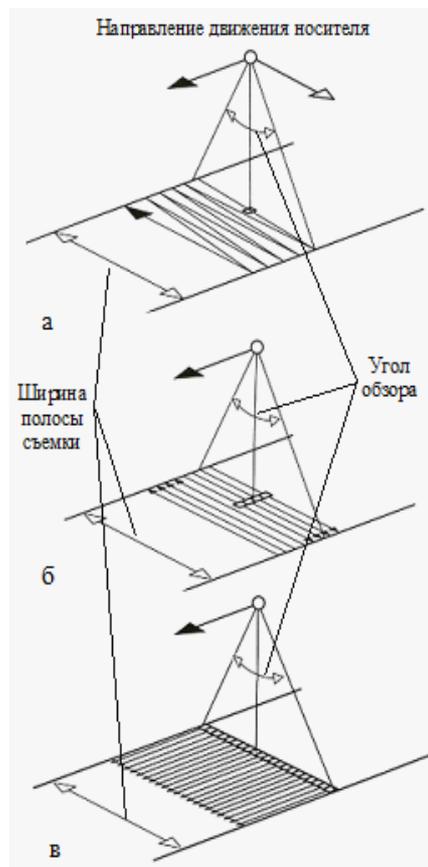


Рис. 2. Схемы сканирования ФЦО при проведении ГС съемки, где обозначено: а - линейное сканирование; б - поперечное сканирование; в - продольное сканирование

Кроме того, в настоящее время существуют альтернативные схемы построения ГС аппаратуры [4, 8], выполненные на базе акустооптических фильтров, жидкокристаллических фильтров, интерферометров и диспергирующих элементов. Схемы на базе жидкокристаллических фильтров обладают сравнительно низким быстродействием и небольшим числом спектральных каналов, кроме этого такие схемы регистрируют излучение только с одной плоскостью поляризации. Устройства на базе интерферометров имеют довольно узкое поле зрения ($\sim 0,5^\circ$) и требуют крайне точной юстировки оптической системы, вследствие чего обладают низкой надежностью и применяются только в лабораторных условиях.

Для современной ГС аппаратуры характерно большое количество спектральных каналов, которое может составлять 100 и более, а спектральный диапазон работы, как правило,

равен 0,4...2,5 мкм [2]. Однако бурное развитие оптоэлектроники обеспечило появление на рынке ГС аппаратуры, позволяющей получать ГС данные одновременно в ближнем (0,8...3,0 мкм), среднем (3,0...5,0 мкм) и дальнем (8,0...14,0 мкм) диапазонах инфракрасного спектра длин волн [5, 6]. При этом для получения «гиперкуба» в среднем и дальнем диапазонах длин волн применяются технические решения, основанные на разложении оптического излучения в спектр с высоким разрешением с помощью дифракционных или интерференционных методов [3].

Лидерами по разработке и применению ГС аппаратуры космического, воздушного и наземного базирования на сегодняшний день являются США, Германия, Израиль, Канада, Финляндия.

В зависимости от решаемых задач ГС аппаратура может устанавливаться не только на космические аппараты [3-6], но и на самолеты и беспилотные летательные аппараты (БЛА) с различной грузоподъемностью. На рис. 3 представлены ГС аппаратура AisaFENIX 1K фирмы Spesim (Финляндия), размещенная на легкомоторном самолете и обеспечивающая съемку в спектральном диапазоне 0,38...2,5 мкм со спектральным разрешением 4,5-14 нм на высотах до 10 км (см. рис. 3а), и аппаратура Leica X6 с ГС камерой Nano-Hyperspec компании Headwall (США), размещенная на БПЛА типа «квадрокоптер» и обеспечивающая съемку в спектральном диапазоне 0,4...1,0 мкм со спектральным разрешением 4,5-14 нм на высотах до 4 км (см. рис. 3б) [3, 6].

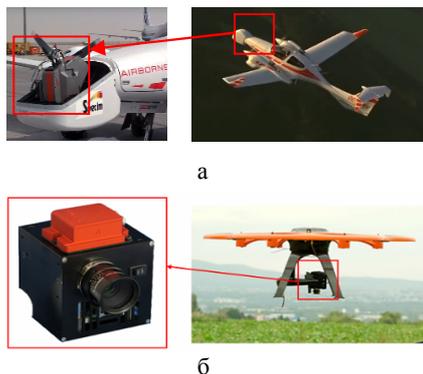


Рис. 3. Внешний вид ГС аппаратуры, установленной на легкомоторном самолете (а) и БЛА типа «квадрокоптер» (б)

Кроме того, на рынке оптико-электронной аппаратуры появилась ГС аппаратура, обеспечивающая получение соответствующих изображений в спектральных диапазонах 3...5

и 8...14 мкм. Так, например, фирмой ITRES (Канада) создана ГС аппаратура TASI-600 (спектральный диапазон работы 8,0...11,5 мкм, поле зрения 400, температурная чувствительность 0,05 К) и TABI-1800 (спектральный диапазон работы 3,7...4,8 мкм, поле зрения 400, температурная чувствительность 0,05 К) [4]. Фирмой Spesim (Финляндия) разработаны ГС камера Spesim FX50 (спектральный диапазон работы 2,7...5,3 мкм, поле зрения 24-600, количество спектральных каналов 150), ГС камера AisaOWL (спектральный диапазон работы 7,7...12,3 мкм, поле зрения 24...320, количество спектральных каналов 96), а фирмой Telops (Канада) - ГС камера Cam Methane с аналогичными камере TASI-600 характеристиками [5].

Внешний вид данной ГС аппаратуры представлен на рис. 4.



Рис. 4. Внешний вид ГС аппаратуры: а - Aisa OWL (фирма Spesim, Финляндия); б - Hyper-Cam Methane (фирма Telops, Канада); в - TASI-600 (фирма ITRES, Канада)

Для работы в наземных условиях фирмой Spesim (Финляндия) разработана уникальная малогабаритная ГС аппаратура [6], которая может быть использована как носимый вариант, обеспечивающий получение ГС данных о ФЦО на наклонных и горизонтальных трассах. Внешний вид портативной ГС камера Spesim IQ, работающей в спектральном диапазоне 0,4...1,0 мкм, представлен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид портативной ГС камеры Spesim IQ

В основу создания данного прибора заложен принцип получения ГС данных о ФЦО путем использования интерференционных фильтров мозаичного типа, наносимых непосредственно на поверхность полупроводниковой пластины высококачественного КМОП-сенсора. Матрица КМОП-сенсора делится на отдельные элементы (мозаику), на каждый эле-

мент которой наносится интерференционный фильтр типа оптического резонатора Фабри-Перо, пропускающего излучение определенного узкого диапазона длин волн. Интеграция указанных сенсоров позволяет формировать ГС данные о ФЦО путем «снятия» с них соответствующей спектральной информации.

Методы обработки информации, применяемые в гиперспектральной аппаратуре

Алгоритм обработки результатов ГС съемки при решении задач вскрытия и идентификации объектов может состоять из следующей последовательности действий:

1. Спектральный анализ полученных экспериментальных данных с целью выявления наиболее информативных участков спектра.

2. Селекция спектров оптического излучения наблюдаемых объектов для формирования исходной информации и принятия решений по обнаружению и идентификации.

3. Анализ и фиксация отличий спектральных характеристик наблюдаемого объекта и проецируемого фона, принятие решения об обнаружении.

4. Сравнение спектральных характеристик обнаруженного объекта и эталона, взятого из соответствующей базы данных, принятие решения об идентификации.

В общем случае сутью решения данных задач является установление принадлежности объекта (пространственного элемента разрешения изображения ФЦО) к определенному классу на основе «близости» спектров данного объекта и эталонного объекта класса. Численное значение «близости» спектров сравниваемых объектов определяется на основе использования некоторого предварительно выбранного критерия, например, минимального расстояния в смысле Евклидовой метрики. Для принятия решения о наличии в поле зрения ГС аппаратуры того или иного объекта широко используется алгоритм, разработанный на основе канонического критерия максимального правдоподобия [7].

В частных случаях могут использоваться другие методы обработки ГС информации. Например, наиболее простым традиционным методом, широко используемым при обработке моноспектральных и мультиспектральных изображений, является построение одного из двух выбранных типов индексных изображений, представляющих собой результат вычитания или деления значений яркости

в рассматриваемых спектральных каналах. Выбор наиболее репрезентативных спектральных диапазонов и числа используемых каналов может осуществляться путем экспертных оценок или с применением компьютерных адаптивных алгоритмов [7].

Широко известным частным вариантом ГС аппаратуры, реализующим спектральную селекцию объектов [7], является двухспектральный теплопеленгатор, в котором задача различения объектов по их спектральной сигнатуре а также выделения их из фона решается путем формирования отношения выходных сигналов двух спектральных каналов и сравнения его с одним или двумя пороговыми уровнями. Решение о наличии объекта принимается, если значение отношения попадает в пороговый интервал.

Выбор наиболее подходящего метода зависит от конкретной решаемой задачи: индивидуальных особенностей спектрального состава изображения ФЦО, цели исследований, а также пространственного и спектрального разрешения имеющихся ГС данных.

Несмотря на то, что в различных источниках приводится значительное число примеров удачной обработки ГС информации, в настоящее время не существует единой универсальной методики, позволяющей с приемлемым качеством решать широкий круг задач, связанных с дешифровкой ГС изображений ФЦО.

Специалисты отмечают следующие три основные проблемы, возникающие при обработке ГС данных: влияние атмосферы, изменчивость спектра, смешанные пиксели. Рассмотрим их более подробно.

Влияние атмосферы заключается в том, что на распространение солнечного излучения через атмосферу оказывают существенное влияние процессы его поглощения и рассеяния в результате воздействия содержащихся в слоях атмосферы газов и различных типов аэрозолей.

Так, например, влияние водяных паров приводит к ослаблению оптического излучения вследствие его поглощения с разной интенсивностью на разных длинах волн: слабое поглощение (0,6 и 0,66 мкм), чуть более сильное (0,73, 0,82 и 0,91 мкм), сильное поглощение (0,94 и 1,14 мкм). Оптическое излучение в окрестностях длин волн 1,375, 1,9 и 2,5 мкм поглощается практически полностью [8].

Таким образом, ГС изображения ФЦО, полученные в результате дистанционного зондирования, подвергнуты искажающему воздействию атмосферы.

Устранение этих искажений проводится с помощью процедуры атмосферной коррекции.

Существует два класса алгоритмов атмосферной коррекции: эмпирические и расчетные.

Первый тип алгоритмов основан на использовании априорной информации о статистических характеристиках изображения ФЦО и осуществляет скорее калибровку, а не компенсацию атмосферных искажений.

Второй тип алгоритмов основан на использовании физико-математических моделей атмосферы, ряд параметров которых регистрируется одновременно с регистрацией ГС изображения ФЦО, а другие рассчитываются с использованием известных спектральных характеристик некоторых пикселей изображения.

После восстановления всех требуемых параметров модели атмосферы искомые коэффициенты отражения исследуемой поверхности рассчитываются с использованием уравнений переноса радиации.

В настоящее время технология атмосферной коррекции достаточно хорошо разработана и продолжает успешно развиваться [8].

Изменчивость спектра. Сутью дешифрации ГС изображения ФЦО является установление для каждого пикселя этого изображения соответствующего ему номера элемента из числа наперед сформированного множества эталонных элементов с известными спектральными характеристиками, изображения которых содержатся или предположительно могут содержаться в данном изображении ФЦО. Источниками спектральных эталонов как правило являются базы данных известных спектральных характеристик различных материалов или репрезентативные пиксели самого изображения ФЦО, для которых эмпирически установлены типы материалов, которым они соответствуют.

Основной проблемой является то, что идеального фиксированного спектра для любого заданного материала не существует. Поскольку даже измеренные в лабораторных условиях спектры отражения образцов одного и того же материала различны вследствие всегда имеющих у данных образцов отличий в степени шероховатости поверхности, ее кривизны и ориентации относительно направления измерений, отклонений химического состава и физического состояния материала и т.п.

Кроме того, спектральные характеристики ГС изображений ФЦО в значительной степени зависят от шумов приемников ГС аппаратуры.

В результате измеренные спектры различных пикселей изображения ФЦО, соответству-

ющие одному и тому же материалу, всегда имеют некоторые расхождения. Это затрудняет обнаружение материалов (веществ) по их уникальным спектральным сигнатурам.

Поэтому необходимо, чтобы алгоритмы, разрабатываемые для дешифрирования ГС изображений ФЦО, обладали устойчивостью по отношению к неопределенности спектров материалов.

Смешанные пиксели. Как было отмечено выше, на первом этапе дешифрации ГС изображения ФЦО предварительно формируется соответствующее данному изображению множество эталонных элементов с известными спектральными характеристиками. Затем, на втором этапе дешифрации для каждого пикселя ГС изображения ФЦО определяется элемент данного множества, спектральная сигнатура которого максимально соответствует спектральной сигнатуре рассматриваемого пикселя.

В случае, когда в элемент пространственного разрешения регистрирующей аппаратуры целиком попадает поверхность только одного эталонного элемента, тогда формируется «чистый» пиксел изображения с эталонной спектральной характеристикой отражения.

Однако основной проблемой является то, что в элемент пространственного разрешения аппаратуры, как правило, попадают в некоторой пропорции поверхности сразу нескольких эталонных элементов. Они фиксируются аппаратурой как одиночный пиксел изображения.

Проблема смешанного пикселя не решается простым улучшением пространственного разрешения регистрирующей аппаратуры, т.к. при этом появляются детали изображения, не регистрируемые ранее, т.е. образуются новые спектральные классы, следовательно, возникает необходимость расширения множества эталонных элементов. Возникает замкнутый круг.

Смешанные пиксели существенно усложняют процедуру дешифрирования изображений. Смешанный пиксел, как правило, не согласован ни с одним из эталонов. При этом его сигнатура может иметь сходство со спектральной сигнатурой другого эталона, который в действительности отсутствует в этом пикселе.

В настоящее время достаточно хорошо проработаны и продолжают непрерывно развиваться методы спектрального разделения (субпиксельной обработки), использующие широкий набор математических технологий для определения исходных компонентов смеси и оценки их процентного содержания [7, 8].

Например, хорошо проработанной технологией является обнаружение присутствия в сцене объектов с заданными спектральными сигнатурами путем проведения согласованной фильтрации. Согласованные фильтры повышают контраст цели относительно фона, который может быть представлен в виде структурированной или стохастической модели. Для решения данной задачи в зарубежной ГС аппаратуре широко используется метод SAM (spectral angle mapper) и его модификации [7]. На выходе формируется изображение, в котором значения пикселей соответствуют относительному содержанию искомого эталонного материала в элементах сцены (в интервале от 0 до 1).

Выводы

Исходя из изложенного выше, можно сделать вывод о том, что ГС аппаратура позволяет получать и обрабатывать ГС данные в видимом (0,36...0,76 мкм), ближнем (до 2,5 мкм), среднем (3,0...5,0 мкм) и дальнем (8,0...14 мкм) инфракрасных диапазонах длин волн для условий ее размещения на космических, воздушных и наземных носителях.

С помощью ГС аппаратуры могут решаться следующие основные задачи:

- мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий;
- геологическое, гидрографическое, почвенное и сельскохозяйственное картографирование;
- составление топографических и военных карт и планов, включающее распознавание типов конструкционных материалов и покрытий, применяемых на различных объектах;
- лабораторный анализ и классификация различных веществ и материалов;
- исследование зависимости спектральных сигнатур зондируемых объектов и поверхностей от параметров их состояния;
- обнаружение и идентификация малоразмерных объектов на фоне подстилающей по-

верхности, определение состояния объектов и происходящих в них процессов;

- определение различий между очень близкими классами объектов, оценка их биохимических и геофизических параметров;
- дистанционное обнаружение (распознавание) замаскированных или заглубленных объектов;
- селекция ложных объектов;
- обнаружение и определение параметров источников оптического излучения.

Дальнейшее развитие ГС аппаратуры позволит существенно повысить возможности средств дистанционного мониторинга и расширить круг решаемых с использованием данной аппаратуры задач.

Литература

1. Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования /Л.А. Ведешин, А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, А.И. Родионов, И.Д. Родионов // Исследование земли из космоса. 2013. № 6. С. 66-75.
2. Линейка авиационных гиперспектрометров ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов/ А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, А.И. Родионов, И.Д. Родионов // Оптический журнал. 2016. Т. 83. Вып. 4. С. 54-62.
3. Аншаков Г.П., Журавель Ю.Н., Федосеев А.А. Эффективность использования мультиспектральных и гиперспектральных данных дистанционного зондирования в задачах мониторинга окружающей среды// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. №4 (42). С. 38-46.
4. Официальный сайт программы экологического картирования и анализа (EnMAP) [Электронный ресурс]. URL: www.enmap.org (дата обращения: 22.11.2019).
5. Официальный сайт фирмы ITRES (Канада) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.itres.com> (дата обращения: 22.11.2018).
6. Официальный сайт фирмы Specim (Финляндия) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spesim.fi> (дата обращения: 22.11.2019).
7. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов / В.П. Иванов, В.И. Курт, В.А. Овсянников, В.Л. Филиппов. Казань: ФНПЦ НПО ГИПО, 2006. 595 с.
8. Журавель Ю.Н., Федосеев А.А. Особенности обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования при решении задач мониторинга окружающей среды// Компьютерная оптика. 2013. №4 (37). С. 471-476.

Поступила 04.06.2020; принята к публикации 20.08.2020

Информация об авторах

Бостынец Игорь Павлович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8(908)135-14-57, e-mail: 2365252@mail.ru

Лопин Виктор Игоревич – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8(910)744-50-74, e-mail: lvi65@rambler.ru

Рогозин Андрей Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел.8(950)7724959, e-mail: izvoronega@mail.ru

Тюрин Герман Леонидович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел.8(908)139-57-58, e-mail: germtyr@yandex.ru

STATE AND APPLICATION PERSPECTIVES OF HYPERSPECTRAL EQUIPMENT FOR DETECTION AND RECOGNITION OF VARIOUS OBJECTS

I.P. Bostynets, V.I. Lopin, A.A. Rogozin, G.L. Tyurin

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

Abstract: this paper deals with the application perspectives of hyperspectral equipment installed on space, aerial and ground-based platforms. It presents structure, basic specifications and capabilities of state-of-the-art and advanced hyperspectral equipment to provide detection and recognition of various objects. The paper examines existing diagrams of hyperspectral equipment construction realized on the basis of acoustic-optical and liquid-crystal filters, interferometers and dispersing elements, as well as practical scanning techniques of target environment being observed. In this work, we present the brief evaluation of existing methodical support used for object detection and recognition based on data processing received using the hyperspectral equipment, as well as enumerate main tasks to be accomplished with the help of this equipment. The work outlines the key problems, arising when processing hyperspectral data, as well as methods and techniques to solve them. In this paper, it is shown that advanced methods used to process data provided by hyperspectral equipment enable solving practical problems connected with environmental monitoring, detection and recognition of small-sized objects, false target selection, discrimination between similar classes of objects, estimation of their biochemical and geophysical parameters

Key words: hyperspectral equipment, spectral resolution, detection, recognition

References

1. Vedeshin L.A., Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P., Rodionov A.I., Rodionov I.D. “Aviation hyperspectral complexes for solving problems of remote sensing”, *Study of the Earth from Space (Issledovaniya zemli iz kosmosa)*, 2013, no. 6, pp. 66-75.
2. Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P., Rodionov A.I., Rodionov I.D. “Line of aviation hyperspectrometers of ultraviolet, visible and near infrared ranges”, *Optical Journal (Opticheskiy Zhurnal)*, vol. 83, issue 4, 2016, pp. 54-62.
3. Anshakov G.P., Zhuravel’ Yu.N., Fedoseev A.A. “Efficiency of using multispectral and hyperspectral remote sensing data in environmental monitoring problems”, *Bulletin of the Samara State Aerospace University (Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta)*, 2013, no. 4 (42), pp. 38-46.
4. Official site of the program of ecological mapping and analysis (EnMAP), available at: www.enmap.org, (access date: 22.11.2019)
5. Official site of the firm ITRES (Canada), available at: <http://www.itres.com>, (access date: 22.11.2019)
6. Official site of the firm Specim (Finland), available at: <http://www.spesim.fi>, (access date: 22.11.2019)
7. Ivanov V.P., Kurt V.I., Ovsyannikov V.A., Fillipov V.L. “Modeling and evaluation of modern thermal imaging devices” (“Modelirovanie i otsenka sovremennykh teplovizionnykh priborov”), FNPTs NPO GIPO, Kazan, 2006, 595 p.
8. Zhuravel’ Yu.N., Fedoseev A.A. “Features of processing hyperspectral remote sensing data when solving problems of environmental monitoring”, *Computer Optics (Kompyuternaya optika)*, 2013, no. 4 (37), pp. 471-476.

Submitted 04.06.2020; revised 20.08.2020

Information about the authors

Igor’ P. Bostynets, Cand. Sc. (Technical), Senior Researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 «А» Starykh Bol’shevikov Str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: 2365252@mail.ru

Viktor I. Lopin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Senior Researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 «А» Starykh Bol’shevikov Str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: lvi65@rambler.ru

Andrey A. Rogozin, Cand. Sc. (Technical), Senior Researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 «А» Starykh Bol’shevikov Str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: izvoronega@mail.ru

German L. Tyurin, Cand. Sc. (Technical), Senior Researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 «А» Starykh Bol’shevikov Str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: germtyr@yandex.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПОВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАТЧ-АНТЕННЫ ДЛЯ СЕТЕЙ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ****С.М. Фёдоров, А.С. Бадаев, Е.А. Ищенко, М.А. Сиваш****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассматриваются проблемы выбора проводниковых материалов для патч-антенны, которая была сконструирована в соответствии с частотным диапазоном сетей пятого поколения, определенного FCC – 37 ГГц. Важность данного исследования вызвана очень высокими частотами работы стандарта IMT-2020 (5G), так как характеристики потерь материалов начинают играть более важную роль, нежели чем на низких частотах. Были определены основные характеристики излучателя в зависимости от типа применяемого материала изготовления проводящего элемента – матрица рассеивания (обратных потерь), коэффициент стоячей волны по напряжению, а также основные параметры диаграмм направленности для выбранного типа излучателя. Проверка производилась с использованием CST Studio Suite, в процессе проверки материал изготовления излучателя изменялся, при сохранении материала диэлектрической подложки производилось моделирование. На основе полученных результатов были составлены таблицы, по которым удобно производить сравнение характеристик антенны в зависимости от типа использованного материала, можно произвести выбор проводника, который рекомендуется нанести на диэлектрическую подложку антенны-излучателя. Показано, что наилучшими характеристиками по обратным потерям (S_{11}) обладает тантал, а по общей эффективности антенны и эффективности излучения – серебро. Статья содержит графики матрицы рассеивания (обратных потерь), диаграммы направленности патч-антенны с основными параметрами

Ключевые слова: патч-антенна, матрица рассеивания, обратные потери, коэффициент стоячей волны по напряжению, диаграмма направленности, проводящие материалы

Введение

Сети пятого поколения – 5G поставили перед разработчиками новые требования не только к конструкции и типам применяемых антенн, но также и к материалам изготовления диэлектрических подложек и проводникам для изготовления излучателя. Одним из самых популярных типов антенн для сетей пятого поколения является прямоугольный патч-излучатель, который зарекомендовал себя за небольшие геометрические размеры, простоту производства, возможности построения ММО антенных решеток [1-3]. Особый интерес уделен разработке диэлектрических подложек, которые способны обеспечить стабильные характеристики на СВЧ, а также интерес в выборе проводника, который будет применен в процессе формирования антенны, однако производство большого числа моделей одной антенны с разными материалами достаточно трудоемкий и дорогостоящий процесс, который можно упростить с использованием специализированного программного обеспечения, например, CST Studio Suite.

Основные исследуемые характеристики

В СВЧ технике очень удобной в процессе

моделирования и анализа является матрица рассеивания – матрица S-параметров, которая связывает между собой параметры комплексных амплитуд волн, падающих и отраженных в клеммах эквивалентного четырехполюсника. Так, каждый порт питания СВЧ устройства принято представлять в виде линии передачи с основным типом волн. В рассматриваемом случае применяется только один порт питания и в результате моделирования будет получен только один элемент матрицы - S_{11} , на основе которого можно получить коэффициент стоячей волны по напряжению:

$$S_{11}(\text{дБ}) = 20 \log \left(\frac{KCBH - 1}{KCBH + 1} \right). \quad (1)$$

Идеальным теоретическим случаем является $KCB = 1$, что обозначает идеальное прохождение сигнала без отражений и потерь, в данном случае $S_{11} = -\infty$ дБ. По параметру KCBH, а соответственно и S_{11} , удобно определять частоту резонанса излучателя, а также полосу рабочих частот.

Другим важным параметром любой антенны является диаграмма направленности в горизонтальной (азимутальной) и вертикальной (по углу места) плоскостях. Для анализа излучателя в данной статье использовались следующие параметры диаграммы направленности:

1. Коэффициент направленного действия (Directivity) – служит для определения излучаемой мощности в заданном направлении.

2. Реальный коэффициент усиления, с учетом потерь на отражение (realized gain) – важный параметр, так как учитывает проблемы несогласованности импедансов антенны и линии передачи.

3. Эффективность антенны (radiation efficiency) и общая эффективность (total efficiency) – являются показателями эффективности излучения и представляют собой КПД излучателя.

4. Уровень боковых лепестков – показывает, насколько уровень боковых лепестков меньше главного.

5. Ширина главного лепестка по уровню 3 дБ.

По всем данным характеристикам удобно отслеживать влияние проводника на характеристики излучателя, так как у каждого материала будут индивидуальные характеристики проводимости [4].

Модель антенны и ее геометрические размеры

Микрополосковый патч-излучатель представляет собой прямоугольный излучатель, нанесенный на подложку из СВЧ-диэлектрика с микрополосковой линией питания – рис. 1.

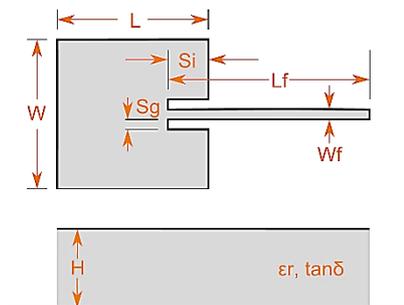


Рис. 1. Параметрическая модель антенны

Проектирование такого излучателя следует начинать с выбора материала-подложки, так как на основе его диэлектрической постоянной производится нахождение геометрических параметров [1]. В исследуемом случае в качестве материала был выбран Rogers RO4730G3, который был специально разработан для создания антенн, работающих в сетях пятого поколения. Диэлектрик выпускается с различными геометрическими размерами, так, для моделирования была выбрана толщина листа – 145 мкм, на который напыляется слой проводника толщиной

35 мкм. Итоговые геометрические параметры антенны приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические размеры патч-антенны

L, мм	W, мм	Wf, мкм	Lf, мм	H, мкм	Si, мкм	Sg, мкм
2,259	2,834	364,5	2,587	145	783	101,2

На основе полученных геометрических размеров была построена 3D-модель излучателя в CST Studio (рис. 2).

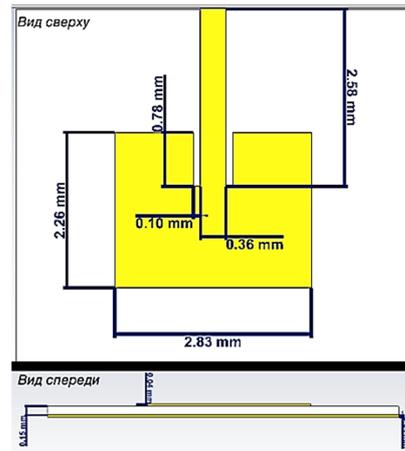


Рис. 2. Модель антенны в CST Studio Suite

Данная антенна рассчитана и настроена для работы на частоте $f_0 = 37$ ГГц, что соответствует одному из диапазонов 5G, которые были выделены FCC в 2019 году [5], причем ее типичная диаграмма направленности в 3D-режиме на частоте резонанса приведена на рис. 3.

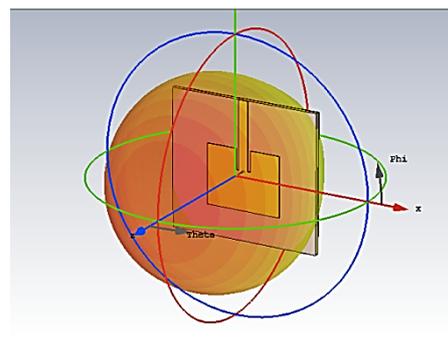


Рис. 3. Диаграмма направленности в трехмерном виде

Исследование влияния проводниковых материалов на S-матрицу

Для исследования влияния материала были выбраны проводящие материалы, которые обладают различными свойствами и характеристиками, более подробно о них рассказано в [4]. Так, для большинства микрополосковых антенн

в настоящее время используется медь, но для более детального изучения характеристик использовались: алюминий, золото, серебро, железо, платина, тантал, молибден.

Было произведено моделирование излучателя со всеми материалами, которые приведены в списке выше, по результатам чего был по-

строен общий график S_{11} параметров (рис. 4), на графике материалы подписаны своими английскими наименованиями: медь – copper, алюминий – aluminum, золото – gold, железо – iron, молибден – molybdenum, платина – platinum, серебро – silver, тантал – tantal; а также по полученным данным была составлена табл. 2.

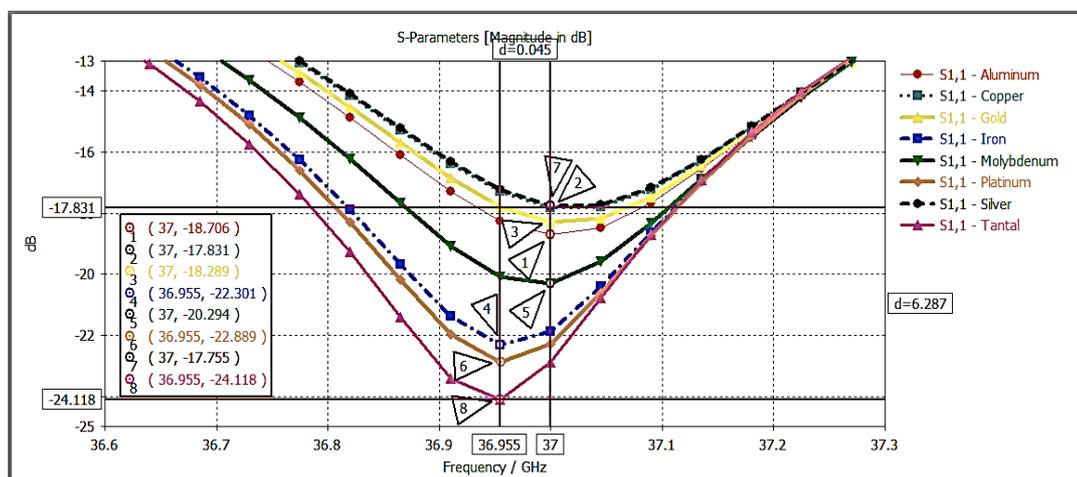


Рис. 4. График S-параметров для всех исследуемых материалов

Измерительные линии используются для отображения смещения частот для тантала, платины, железа (с 37 ГГц до 36,955 ГГц), а также для отображения разности минимума и

максимума значения для тантала и серебра, маркеры показывают минимумы и частоты для каждого из материалов.

Таблица 2

Анализ резонансных характеристик антенны в зависимости от проводника

	Медь	Алюминий	Золото	Серебро	Железо	Платина	Тантал	Молибден
Частота резонанса, ГГц	37	37	37	37	36,955	36,955	36,955	37
S_{11} , дБ	-17,83	-18,71	-18,28	-17,76	-22,3	-22,9	-24,12	-20,29
КСВН	1,29	1,26	1,28	1,30	1,17	1,15	1,13	1,21

Согласно полученным результатам, наименьшие обратные потери и наименьший КСВН обеспечивает тантал, в то время как наихудшими показателями обладает серебро, так, разность в показателях S_{11} составляет 6,36 дБ. Но только на основе полученных данных нельзя сделать вывод о необходимости использования конкретного материала для изготовления излучателя, так как необходимо произвести анализ диаграмм направленности антенны, а также ее эффективности.

Исследование диаграмм направленности патч-антенны в зависимости от применяемого проводника

Для исследования основных характеристик диаграмм направленности необходимо выбрать частоту, на которой будет производиться построение графиков, в данном случае она будет соответствовать частоте резонанса-диапазона 5G – 37 ГГц. Все диаграммы направленности будут построены для двух плоскостей: вертикальной (по углу места $\varphi = 90^\circ$) и горизонтальной (азимутальной $\theta = 90^\circ$). На диаграммах направленности имеются все основные характеристики – направление излучения, ширина главного лепестка, уровень боковых лепестков, КНД.

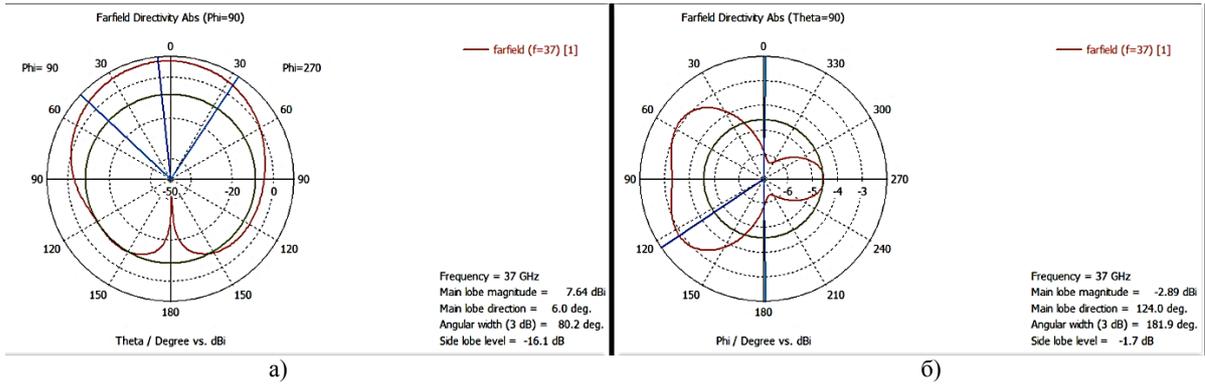


Рис. 5. Диаграммы направленности при использовании меди: а – вертикальная; б – горизонтальная

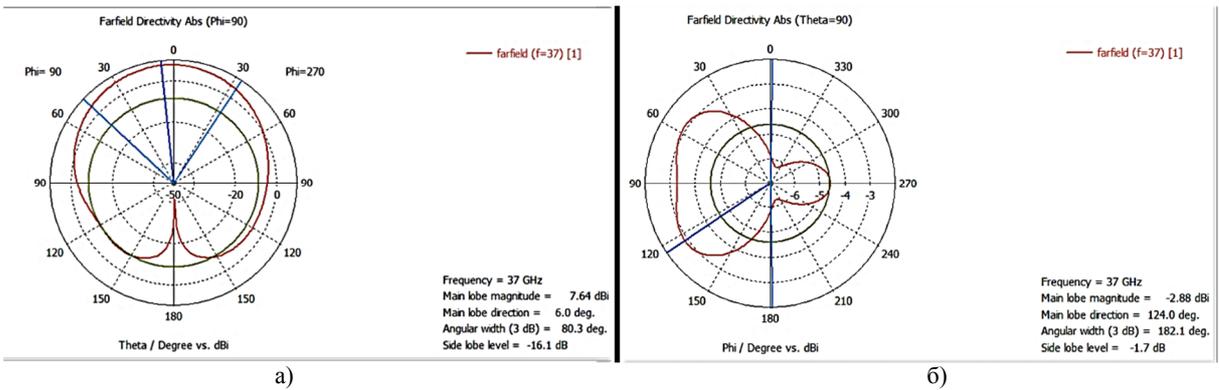


Рис. 6. Диаграммы направленности при использовании алюминия: а – вертикальная; б – горизонтальная

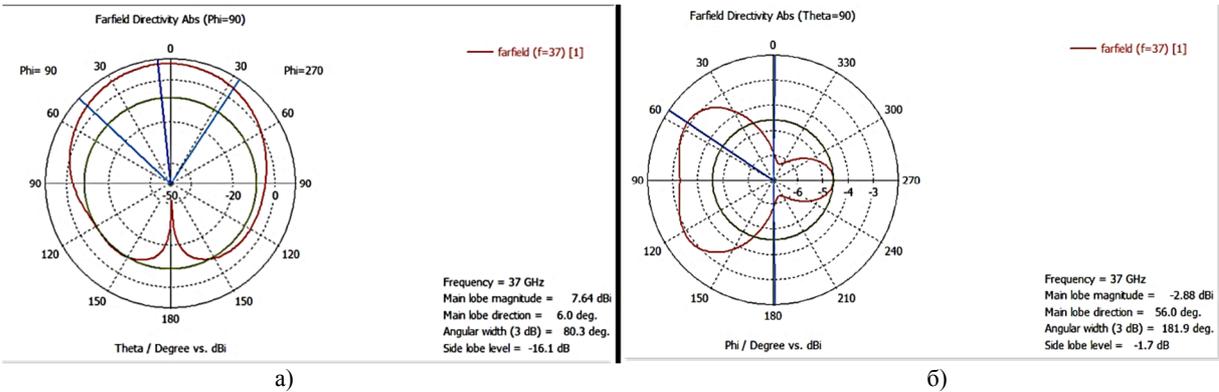


Рис. 7. Диаграммы направленности при использовании золота: а – вертикальная; б – горизонтальная

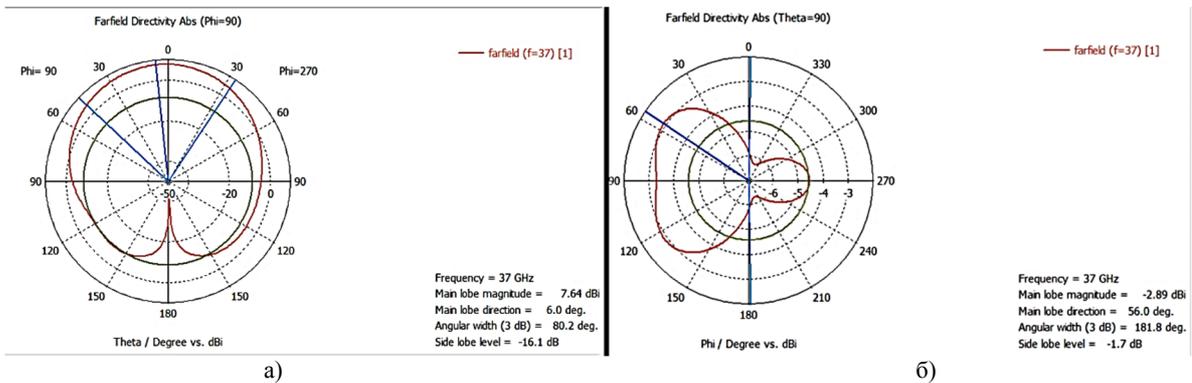


Рис. 8. Диаграммы направленности при использовании серебра: а – вертикальная; б – горизонтальная

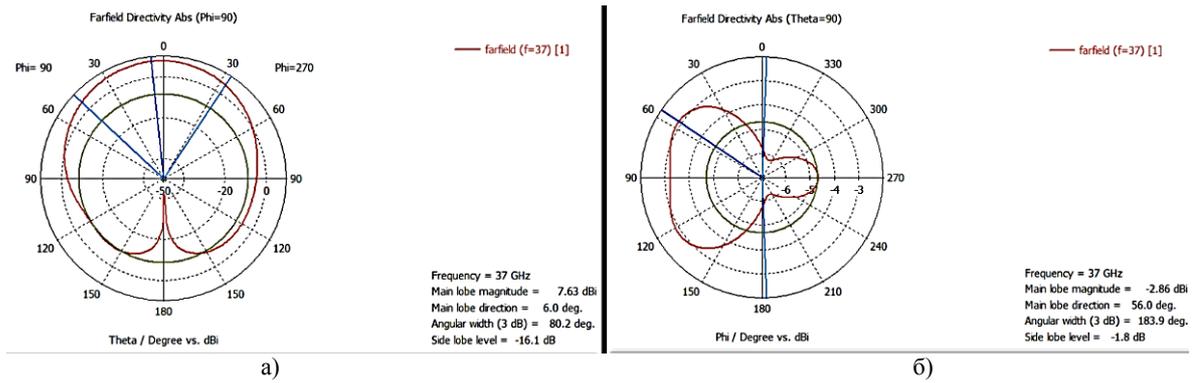


Рис. 9. Диаграммы направленности при использовании железа: а – вертикальная; б – горизонтальная

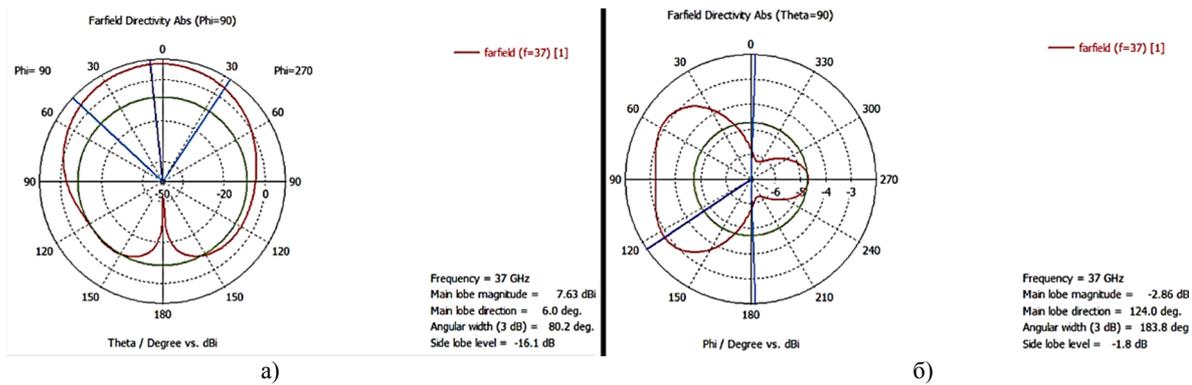


Рис. 10. Диаграммы направленности при использовании платины: а – вертикальная; б – горизонтальная

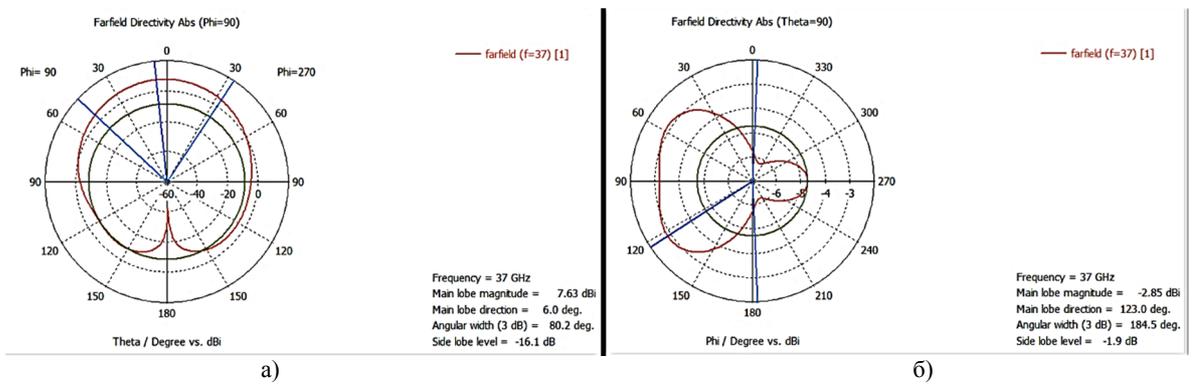


Рис. 11. Диаграммы направленности при использовании тантала: а – вертикальная; б – горизонтальная

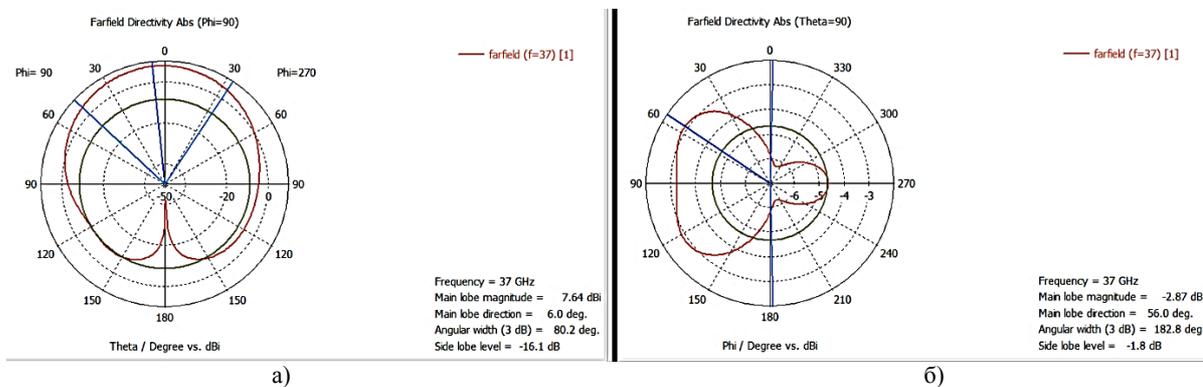


Рис. 12. Диаграммы направленности при использовании молибдена: а – вертикальная; б – горизонтальная

На основе полученных результатов была сформирована сводная табл. 3, в которой

отображены все основные результаты моделирования для диаграмм направленности.

Таблица 3

Зависимость характеристик диаграмм направленности от материала изготовления излучателя

	Медь	Алюминий	Золото	Серебро	Железо	Платина	Тантал	Молибден
КНД, дБи	7,638	7,635	7,636	7,638	7,630	7,634	7,628	7,635
Эффективность излучения, дБ	-1,585	-1,696	-1,643	-1,576	-2,089	-2,128	-2,230	-1,887
Общая эффективность, дБ	-1,658	-1,755	-1,708	-1,649	-2,110	-2,154	-2,252	-1,927
КНД в вертикальной плоскости, дБи	7,64	7,64	7,64	7,64	7,63	7,63	7,63	7,64
Направление излучения в вертикальной плоскости, °	6	6	6	6	6	6	6	6
Ширина главного лепестка 3 дБ в вертикальной плоскости, °	80,2	80,3	80,3	80,2	80,2	80,2	80,2	80,2
УБЛ в вертикальной плоскости, дБ	-16,1	-16,1	-16,1	-16,1	-16,1	-16,1	-16,1	-16,1
КНД в горизонтальной плоскости, дБи	-2,89	-2,88	-2,88	-2,89	-2,86	-2,86	-2,85	-2,87
Направление излучения в горизонтальной плоскости, °	124	124	56	56	56	124	123	56
Реальный коэффициент усиления, дБи	5,980	5,880	5,928	5,989	5,513	5,480	5,375	5,707

По полученным данным видно, что наилучшими характеристиками излучения обладают серебряный и медный излучатели, при этом КПД серебряного излучателя лучше, нежели чем медного. Наихудшим оказался излучатель, который изготовлен из тантала.

Заключение

1. По полученным результатам можно сделать вывод, что применение различных материалов в качестве проводников на частотах сетей пятого поколения (5G) оказывает серьез-

езное влияние на характеристики матрицы рассеивания и диаграмму направленности.

2. Наилучшие показатели по коэффициенту стоячей волны по напряжению оказывает тантал, однако его применение является достаточно трудоемким, так как у этого материала наблюдается изменение удельного сопротивления под электрической нагрузкой в атмосферных условиях, для борьбы с этим недостатком рекомендуется проводить легирование азотом, что приводит к удорожанию и усложнению процесса применения данного материала.

3. По проведенному моделированию диаграмм направленности можно сделать вывод, что наилучшими характеристиками излучения обладает серебро, которое достаточно часто применяют в СВЧ технике для создания слоя с высокой проводимостью, однако главным недостатком серебра является склонность к проникновению внутрь диэлектрической подложки, особенно при высоких температурах и влажности, что является существенным недостатком, так как подобные патч-антенны ис-

пользуются в ММО антенных решетках в мобильных устройствах, которые, как правило, рассчитаны на работу в диапазоне от 0 до 35°C и при влажности от 0 до 90%.

4. Таким образом, медь является по-прежнему наиболее оптимальным материалом для изготовления излучающих элементов в СВЧ диапазоне.

Литература

1. Comparative Study of Rectangular and Circular Microstrip Patch Antennas in X Band / Tahsin Ferdous Ara Nayna; A. K. M. Baki; Feroz Ahmed, IEEE, 2014. 5 p.
2. Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna / Houda Werfelli, Khaoula Tayari, Mondher Chaoui, Mongi Lahiani, Hamadi Ghariani, IEEE, 2016. 6 p.
3. Design of 2×2 MIMO Microstrip Antenna Rectangular Patch Array for 5G Wireless Communication Network / Yusnita Rahayu, Ivan Rafli Mustofa// Conference: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL). 2017. 5 p.
4. Чернышов А.В., Бадаев А.С. Радиоматериалы: проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы: учеб. изд. Воронеж: Из-во ВГТУ, 2008. 202 с.
5. The FCC's 5G FAST Plan / FCC Technical Note, Washington DC, 2019. 1 p.

Поступила 20.06.2020; принята к публикации 18.08.2020

Информация об авторах

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Бадаев Андрей Станиславович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29

Ищенко Евгений Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Сиваш Михаил Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: sivmikha@yandex.ru

STUDY OF THE INFLUENCE OF TYPES OF CONDUCTOR MATERIALS ON THE CHARACTERISTICS OF THE PATCH-ANTENNA FOR THE FIFTH GENERATION COMMUNICATIONS

S.M. Fyedorov, A.S. Badaev, E.A. Ishchenko, M.A. Sivash

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the problems of selecting conductive materials for a patch antenna, which was designed in accordance with the frequency range of the fifth-generation networks defined by the FCC - 37 GHz, are considered. The importance of this study is due to the very high frequencies of the IMT-2020 (5G) standard since the characteristics of material losses begin to play a more important role than at low frequencies. The main characteristics of the emitter were determined depending on the type of material used for the manufacture of the conductive element - the scattering matrix (return loss), the voltage standing wave ratio, as well as the main parameters of the radiation patterns for the selected type of emitter. Verification was carried out using CST Studio Suite, during the verification process the material of manufacture of the emitter was changed, while maintaining the material of the dielectric substrate, modeling was performed. Based on the results obtained, tables were compiled according to which it is convenient to compare the characteristics of the antenna depending on the type of material used, according to which it is possible to choose a conductor that is recommended to be applied to the dielectric substrate of the antenna emitter. It was shown that tantalum has the best return loss (S_{11}) characteristics, while silver has the highest overall antenna

and radiation efficiency. The article contains graphs of the dispersion matrix (return loss), radiation patterns of the patch antenna with the main parameters

Key words: patch-antenna, scattering matrix, return loss, voltage standing wave ratio, radiation pattern, conductive materials

References

1. Tahsin Ferdous Ara Nayna, Baki A.K.M., Feroz Ahmed “Comparative study of rectangular and circular microstrip patch antennas in X band”, *IEEE*, 2014, 5 p.
2. Houda Werfelli, Khaoula Tayari, Mondher Chaoui, Mongi Lahiani, Hamadi Ghariani “Design of rectangular microstrip patch antenna”, *IEEE*, 2016, 6 p.
3. Yusnita Rahayu, Ivan Rafli Mustofa “Design of 2×2 MIMO microstrip antenna rectangular patch array for 5G wireless communication network”, *Conference: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, 2017, 5 p.
4. Chernyshov A.V., Badaev A.S. “Radio materials: conductor, semiconductor and magnetic materials” (“Radiomaterialy: provodnikovye, poluprovodnikovye i magnitnye materialy”), VSTU, 2008, 202 p.
5. “The FCC’s 5G FAST Plan”, FCC Technical Note, Washington DC, 2019, 1 p.

Submitted 20.06.2020; revised 18.08.2020

Information about the authors

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Andrey S. Badaev, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29

Evgeniy A. Ishchenko, student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Mikhail A. Sivash, student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: sivmikha@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЭС

А.С. Костюков, А.В. Башкиров, М.Ю. Гостев, А.С. Демихова, Ю.А. Пирогова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: определение надёжности конструкции радиоэлектронных средств (РЭС) является главной задачей в процессе проектирования новых устройств. Благодаря этой операции можно подобрать актуальный материал будущей конструкции, а также определить уязвимые к износу и повреждениям узловые соединения. В связи со всем вышеизложенным наиболее перспективно проводить данные исследования еще на начальных этапах разработки устройства, что позволит значительно сэкономить затраченные на проектирование ресурсы и время. Учитывая все эти цели, актуальным становится вопрос о применении специализированных программ для определения надёжности конструкции радиоаппаратуры. К таким программным продуктам можно отнести Creo, SolidWorks, АСОНИКА, ANSYS и Nastran. Именно об этих программных средах и пойдёт речь. Кратко изложено о каждой из перечисленной выше программ, представлены их основные характеристики, достоинства и недостатки. Данные программные продукты сравниваются между собой по таким показателям, как удобство использования и достоверность полученных данных при проведении прочностного анализа конструкции РЭС. Наглядно показано, в чём эти программы схожи, а чем отличаются. Представлена сравнительная таблица, по которой сделаны актуальные выводы о достоинствах и недостатках той или иной программы и в каких рабочих условиях лучше использовать каждую из вышеописанных программных сред

Ключевые слова: Creo, SolidWorks, АСОНИКА, ANSYS, Nastran, конечно-элементная сетка, прочностной анализ

Введение

Прочностной анализ является одним из важнейших составляющих этапов в проектировании конструкции РЭС. Он проводится на начальных стадиях проектирования изделия и служит для определения материалов и размеров механической конструкции будущего изделия. Данный анализ способен выявить, какие именно нагрузки способно выдержать разрабатываемое устройство в процессе эксплуатации.

Подобный анализ можно производить, исследуя механические характеристики конструкции РЭС. Для исследования используют различные моделирующие программные комплексы, которые позволяют моделировать различные нагрузки, испытываемые конструкцией радиоаппаратуры.

В данный момент на рынке существует несколько хорошо зарекомендовавших себя программ для проведения подобных исследований. Так, в данной статье приводится сравнительный анализ таких программных продуктов, как Creo, SolidWorks, АСОНИКА, ANSYS и Nastran. Далее в статье данные программы будут рассмотрены более подробно, а именно, представлены их основные технические характеристики, а также достоинства и недостатки каждой из программ.

Creo

PTC Creo – это программа, которая разработана фирмой PTC на основе таких программных продуктов, как Pro/ENGINEER и CoCreate, позволяющая проводить двухмерное и трехмерное проектирование.

Creo состоит из нескольких подпрограмм, каждая из которых может работать независимо друг от друга, это программы Creo Parametric, Creo Direct, Creo View, Creo Simulate, Creo Sketch и т.д. Главной подпрограммой, в которой можно производить большую часть действий, является Creo Parametric.

Подпрограмма, которая отвечает за исследования на надёжность, называется Creo Simulate, в основе её алгоритмов лежит так называемый метод конечных элементов (МКЭ).

Сам МКЭ – является методом решения дифференциальных уравнений с частными условиями и интегральных уравнений, которые, в свою очередь, часто встречаются в прикладной физике. Расчёт МКЭ можно описать так: экспериментальная область разделяется на конечные элементы, потом в одиночных элементах необходимо выбрать вид развивающейся функции, после этого определяются числа данных функций на границах элементов. Операция разбиения модели на подгруппы называется созданием сетки [1].

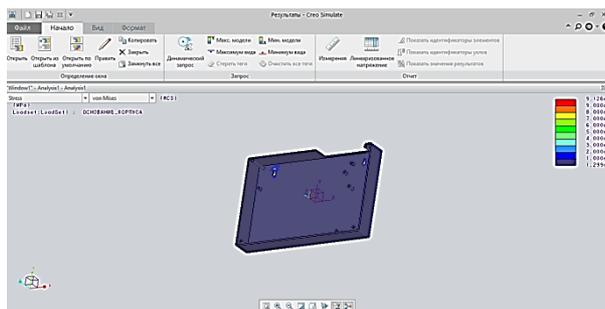


Рис. 1. Рабочее окно Creo Simulate

В стандартной версии Creo Simulate можно проводить следующие виды анализов:

- Статический анализ;
- Модальный анализ;
- Исследования на устойчивость;
- Исследования на усталость;
- Преднапряжённый анализ;
- Динамический анализ;
- Расчёт температурных полей

Более подробно о Creo можно почитать в [1] и [2].

SolidWorks

SolidWorks – программное обеспечение, разработанное компанией SolidWorks Corporation и входящее в число наиболее используемых CAD-систем современности.

SolidWorks Simulation – это специальный модуль, в основе которого лежит метод конечных элементов и который позволяет определять прочность разрабатываемого изделия.

Виды исследований в SolidWorks Simulation:

- Статические исследования;
- Частотные исследования;
- Исследования потери устойчивости;
- Исследования на термическую нагрузку;
- Операции на удары;
- Исследования на усталость изделия;
- Расчёт нелинейных систем;
- Исследования на динамическую нагрузку;
- Оптимизация параметров устройства;
- Исследования для сосудов с высоким давлением

В SolidWorks применяется обычное командное меню, в которое входит:

- Раздел исследований;
- Главное поле;
- Различные инструменты [3]

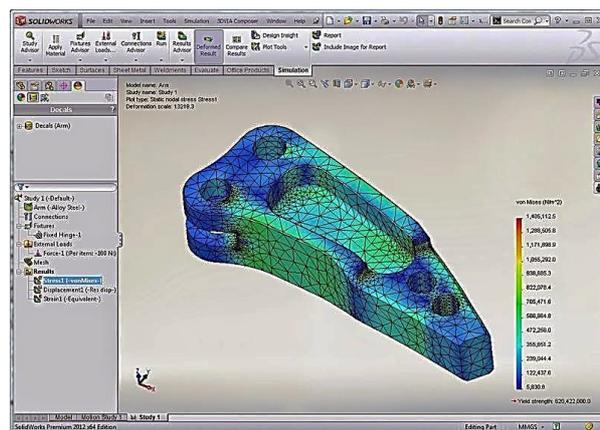


Рис. 2. Рабочее окно SolidWorks Simulate

В модуле Simulation можно производить действия над всеми компонентами SolidWorks. К ним относятся: вершины, кромки, грани, оси, плоскости, системы координат и т.п. На одних действуют граничные условия, на других силы и перемещения. Подробно о SolidWorks расписано в [3], [4] и [5]

АСОНИКА

АСОНИКА – совокупность программ, предназначенных для конструирования, оптимизации характеристик и определения надёжности РЭС, разработанная НИИ «АСОНИКА». Данный программный комплекс, в первую очередь, ориентирован на разработчика РЭА. В состав комплекса АСОНИКА входят 22 модуля. Данные подпрограммы позволяют исследовать механические, электрические, тепловые и т.п. характеристики, а также производить интеграцию различных типов файлов, которые были созданы в других CAD и CAE системах. Ниже перечислены некоторые из этих подсистем:

- АСОНИКА-Т;
- АСОНИКА-М;
- АСОНИКА-М-ШКАФ;
- АСОНИКА-М-3D;
- АСОНИКА-ИД;
- АСОНИКА-Б;
- АСОНИКА-В;
- АСОНИКА-ТМ;
- АСОНИКА-Р;
- АСОНИКА-УСТ;
- АСОНИКА-ЭМС;
- АСОНИКА-БД;
- АСОНИКА-УМ;
- АСОНИКА-А;

- АСОНИКА-П;
- АСОНИКА-Д;
- АСОНИКА-У;
- АСОНИКА-С;
- АСОНИКА-К;
- АСОНИКА-К-ЗИП;
- АСОНИКА-К-СИ;
- АСОНИКА-К-СЧ.

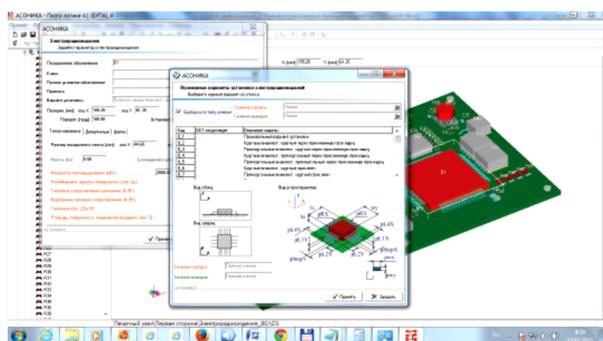


Рис. 3. Рабочее окно АСОНИКА

На отечественном рынке данная программа является единственной в своём роде, выполняя такой спектр исследований, из мировых аналогов можно привести в качестве примера такие программные комплексы, как ANSYS, NASTRAN, COMSOL. И то данные системы выполняют только некоторые функциональные расчёты в сравнении с системой АСОНИКА [6].

В статье рассматривается более подробно подсистема АСОНИКА-М-3D, т.к. именно данная подпрограмма позволяет выполнять расчет механических характеристик конструкции РЭС. Более полно об АСОНИКА написано в [6], [7], [8] и [9].

ANSYS

ANSYS – это программный комплекс, разработанный компанией ANSYSinc, который позволяет производить моделирование различных процессов в инженерно-исследовательских целях. В своей основе рассматриваемый продукт использует так называемый метод конечных элементов для производимых расчётов алгоритмов. С помощью программной среды ANSYS можно производить следующие типы анализов:

- Анализ механических характеристик;
- Анализ теплового режима;
- Анализ гидродинамики;
- Анализ электрических характеристик;
- Стационарные анализы;

- Линейные анализы;
- Анализ акустики.

К достоинствам программного пакета ANSYS можно отнести удобный интерфейс, постоянные обновления и техническую поддержку, а также возможность работы в данном комплексе с различными типами файлов.

В связи с тем, что среда ANSYS является зарубежной разработкой, следует отметить, что в данной программе отсутствует русифицированный интерфейс, что несколько осложняет работу в данной среде нашим соотечественникам. Полные аналитические данные о ANSYS представлены в [10] и [11].

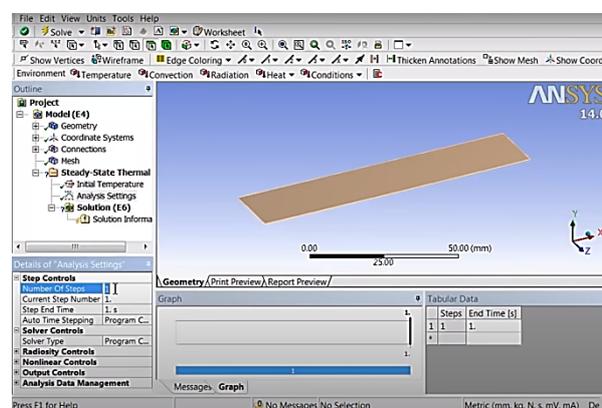


Рис. 4. Рабочее окно ANSYS

Nastran

Nastran – программная среда, разработанная компанией Simens PLM Software на основе метода конечных элементов, которая используется для моделирования различных динамических и статических процессов. Данный программный комплекс нашел применение в различных отраслях промышленности, начиная от автомобильного строения и заканчивая аэрокосмическими разработками.

В своей основе Nastran состоит из различных модулей и подпрограмм, которые обеспечивают ему возможность производить множество разнообразных исследований, а также позволяют интегрироваться с другими CAD и CAE системами.

В программе Nastran можно производить следующие виды исследований:

- Статический линейный анализ;
- Частотный анализ;
- Моделирование устойчивости;
- Расчет тепловых режимов;
- Оптимизация конструкции;
- Анализ динамики роторных машин.

За свою более чем сорокалетнюю историю программный комплекс Nastran доказал свою эффективность и надёжность в исследованиях моделирования различных процессов, что подтверждается использованием данной программы на многих промышленных предприятиях и исследовательских институтах. С полным описанием программного комплекса Nastran можно ознакомиться в [12].

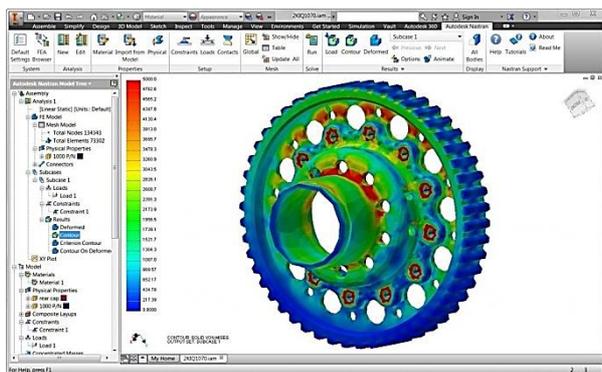


Рис. 5. Рабочее окно Nastran

Сравнение программных сред

В ходе исследования был произведён анализ прочности нескольких деталей в системах Creo, SolidWorks, АСОНИКА, ANSYS и Nastran. В данном пункте показаны принципиальные различия при анализе прочности в рассматриваемых программах.

Самым первым, что бросается в глаза при работе с вышеперечисленными программами - это наличие русифицированного интерфейса, так, в программной среде ANSYS он отсутствует, что несколько усложняет работу с данной программой. Во всех остальных программных продуктах интерфейс адаптирован для российских пользователей и сложности работы в них не возникает.

Все рассматриваемые программные комплексы в своих расчётах используют так называемый метод конечных элементов, что делает логику расчётов данных сред схожими. Сам МКЭ в вышеописанных комплексах предполагает применение одинаковых действий: фиксирование деталей, расстановки нагрузок и т.п. Из-за этого принципиальные различия исследуемых программ относятся по большей части в удобстве использования и дополнительных функциях. Следует отметить, что исследование конструкции на прочность можно производить, используя как отдельные компоненты, так и сборки. Данная особенность актуальна

для всех вышеописанных программ. Также можно отметить, что все выше перечисленные программы способны поддерживать большое количество разнообразных форматов файлов, что обеспечивает им прекрасную совместимость с другими CAD и CAE системами.

Одной из главных задач при исследовании конструкции на надёжность - это определить силы, которые действуют на её элементы. В связи с этим важным является наличие соответствующих систем измерений в использованной программной среде. По этому показателю все тестируемые программы показывают хороший результат, все они поддерживают разные системы измерений, это и стандартные единицы СИ метр-килограмм-секунда (МКС), и сантиметр-грамм-секунда (СГС), и миллиметр-грамм-секунда (ммГС), и дюйм-фунт-секунда (ДФС) и др. Также следует отметить, что в программных средах Steo и АСОНИКА существует возможность создать собственную локальную систему измерений для конкретного анализа.

Рассмотрим подробнее возможности построения конечно-элементной сетки (КЭС) в рассматриваемых программных продуктах. Так, все тестируемые программы объединяет возможность редактировать частоту и размер КЭС на отдельных деталях конструкции, это позволяет сделать проведение прочностного анализа сложных конструкций более простым. Следует отметить, что положительной функциональной особенностью Steo в отличие от остальных программ является, что при расстановке напряжений, которые воздействуют на исследуемую конструкцию, совсем не обязательно строить КЭС.

Также общей чертой является, что в данных программах можно произвести диагностирование, что позволяет увидеть недостатки исследуемой конструкции. Например, диагностика может показать, какие внешние нагрузки были неправильно расставлены или же вообще противоречат друг другу. Данная функция позволяет определить недочёты исследуемой детали ещё на ранней стадии производимого анализа, что позволяет внести необходимые изменения для их устранения.

Интересной общей чертой перечисленных программ является возможность посмотреть, какие силы действуют на представленную модель, с помощью анимации воздействий. Данная функция даёт возможность инженеру проанализировать информацию о том, какие

нагрузки воздействуют на исследуемую конструкцию [13].

Последнее, на что хотелось обратить внимание, это стоимость покупки лицензии рассматриваемых программ. Так, самой дорогой системой, представленной в обзоре, является ANSYS, цена которого может достигать 3000000 р. Такая высокая стоимость в целом объясняет не распространенность данного программного продукта при его средних показателях в сравнении с другими программами. Самой дешевой программной разработкой является SolidWorks, который стоит всего лишь 148800 р. Благодаря своей малой цене данный

программный продукт смог завоевать популярность среди предприятий малого бизнеса. Также можно отметить программу АСОНИКА, цена лицензии которой составляет 300000 р. Однако следует помнить, что данная сумма, это цена одного блока системы, а именно цена АСОНИКА–М-3D, если же рассматривать полностью весь программный комплекс АСОНИКА, который состоит из 22 подсистем, то общая сумма всей программной среды будет многократно выше.

Более подробно различия и сходства вышеописанных программ представлены в таблице.

Сравнение программных продуктов Creo, SolidWorks, АСОНИКА, ANSYS, Nastran

	Creo	SolidWorks	АСОНИКА	ANSYS	Nastran
Стоимость лицензии (руб.)	912000	148800	300000	3000000	2000000
Поддерживаемые системы единиц	СИ (МКС); ДФС; ДФ-МС; ммКС; ммНС; СГС ФФС; Возможность создать собственную систему	СИ (МКС); СГС; ммГС; ДФС	СИ (МКС); ДФС; ДФ-МС; ммКС; ммНС; СГС ФФС; Возможность создать собственную систему	СИ (МКС); ДФС; ДФ-МС; ммКС; ммНС; СГС ФФС;	СИ (МКС); ДФС; ДФ-МС; ммКС; ммНС; СГС ФФС;
Поддерживаемые форматы файлов	prt; asm; drw; frm; mfg; lay; sec; int; g; tmu; tmz; cem; bdl; pkg; sdp; sda; sdac; sdpc; igs; iges; vda; dxf; neu; ibl; pts; rwd; rwt; mrs; xdb;	sat; ai; psd; dxf; dwg; hsf; emn; brd; bdf; idb; ifc; igs; iges; jpg; pdf; 3dm; stp; step; stl; tif; vda; mts; wrl; xml;	prt; asm; drw; frm; mfg; lay; sec; int; g; tmu; tmz; cem; bdl; pkg; sdp; sda; sdac; sdpc; igs; iges; vda; dxf; neu; ibl; pts; rwd; rwt; mrs; xdb;	prt; asm; frm; mfg; lay; sec; int; g; tmu; tmz; cem; bdl; pkg; sdp; sda; sdac; sdpc; igs; iges; vda; dxf; ibl; pts; rwd; mrs; xdb; stp; step; cgm; stl;	prt; asm; drw; frm; mfg; lay; sec; int; tmu; tmz; cem; bdl; pkg; sdp; sda; sdac; sdpc; vda; dxf; neu; ibl; pts; rwt; mrs; xdb; stp; step; cgm; stl;

	stp; step; cgm; stl; obj; wrl; dwg emn; sldprt; sldasm; 3dm; par; sla		stp; step; cgm; stl; obj; wrl; dwg emn; sldprt; sldasm; 3dm;	cgm; wrl; dwg emn; sldprt; sldasm; 3dm; par; sla	obj; wrl; dwg emn; sldprt; sldasm; 3dm; par; sla
Русифицированный интерфейс	Да	Да	Да	Нет	Да
Способ решения алгоритмов	МКЭ	МКЭ	МКЭ	МКЭ	МКЭ
Виды проводимых анализов	Статический; Модальный; Устойчивость; Усталость; Преднапряжённый; Динамический; Расчёт температурных полей; Возможность докупить дополнительные исследования;	Статические; Частотные; Устойчивость; Термическая нагрузка; Операции на удары; Усталость; Расчёт нелинейных систем; Динамическая нагрузка; Оптимизация параметров; Исследования для сосудов с высоким давлением;	Статистический; Устойчивости; Частотный; Тепловой; Динамический; Анализ показателей безотказности На вибрацию Усталость и долговечность Анализ электромагнитной совместимости Анализ аэродинамики; Анализ гидравлических характеристик	Анализ механических характеристик; Анализ теплового режима; Анализ гидродинамики; Анализ электрических характеристик; Стационарные анализы; Линейные анализы; Анализ акустики. Анализ электромагнитного поля	Линейная статика; Расчет частот собственных колебаний; Анализ чувствительности характеристик объекта к конструктивным изменениям; Проверка корректности расчетной модели; Оптимизация конструкции Моделирование динамики роторных машин Анализ на усталость и долговечность Анализ теплопередачи Анализ аэроупругости
Взаимодействие с КЭС	Можно регулировать частоту и размер сетки на определенных участках конструкции	Можно регулировать частоту и размер сетки на определенных участках конструкции	Можно регулировать частоту и размер сетки на определенных участках конструкции	Можно регулировать частоту и размер сетки на определенных участках конструкции	Можно регулировать частоту и размер сетки на определенных участках конструкции
Анимация модели	Да	Да	Да	Да	Да
Выявление противоречивых нагрузок	Да	Да	Да	Да	Да
Аттестация министерством обороны	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Электронно-компонентная база	Да	Да	Да	Нет	Нет
Учитываются ли особенности свойств материалов	Да	Нет	Да	Нет	Нет

Проанализировав выше представленную таблицу, можно сделать некоторые выводы о рассматриваемых программных продуктах.

Так, одной из наиболее распространенных и функциональных программ является Creo. Это обуславливается некоторыми причинами, во-первых, большое количество поддерживаемых систем измерений, что позволяет подобрать необходимую систему исчислений под проводимые исследования. Также в случае необходимости в данной программе можно воссоздать собственную систему измерительных единиц, что позволяет использовать данный программный продукт практически для любых инженерных исследований, что выгодно отличает программу от своих конкурентов. Во-вторых, большой выбор поддерживаемых форматов файлов, что позволяет работать с моделями, которые были спроектированы в других программных средах. В-третьих, большое количество проводимых анализов даже в стандартной версии Creo, а также возможность докупить дополнительные виды исследований, используя специально разработанные библиотеки, что делает данный программный комплекс универсальным средством виртуальной модуляции практически любых физических воздействий.

Из недостатков можно выделить высокую цену на стандартную версию программы, а также платный дополнительный контент, в связи с чем ограничивается повсеместное использование данного программного продукта, в основном пользователями данной программы являются профессиональные инженеры, работающие в крупных компаниях или же в научно-исследовательских центрах. Следует также отметить, что в большинстве случаев такое количество исследований и систем единиц не нужно в проводимых исследованиях для предприятий среднего и малого звена, а также в учебных целях в вузах.

Самой распространённой программной средой предприятий среднего и малого звена, а также в учебных заведениях из приведённых в данной статье является SolidWorks. Это обусловлено такими причинами, как низкая цена на лицензию и тем, что компания SolidWorks Corporation предоставляет бесплатные учебные версии программы для вузов и колледжей, что и обуславливает её распространённость. Большое количество поддерживаемых форматов файлов, что позволяет работать с различными моделями. Большое количество различных проводимых исследований, общее

количество которых даже превосходит стандартную версию Creo. Единственное, в чём SolidWorks уступает своим конкурентам, так это в количестве поддерживаемых единиц исчисления, но для большинства исследований данного объёма вполне хватает. Всё вышеописанное и объясняет такую распространённость SolidWorks на рынке в среде технических предприятий.

Единственной российской разработкой, представленной в обзоре, является программный комплекс АСОНИКА, разработанный НИИ «АСОНИКА». Данная программа разработана согласно отечественным ГОСТам и является единственной программной разработкой, которая получила аттестацию от Министерства обороны РФ. В связи с этим получила наибольшее распространение в оборонной промышленности, в авиапромышленности и космической отрасли, в частности, данная программа активно используется в государственной компании Роскосмос, где её используют в целом из-за того, что это отечественная разработка, а вышеописанная организация является закрытой государственной структурой. В целом АСОНИКА является перспективной программной средой благодаря своей мощной математической базе, что позволяет ей производить большое количество различных исследований и не ограничиваться механическими воздействиями и температурными анализами. Благодаря своей модульной структуре программа позволяет приобретать именно те подпрограммы, которые необходимы инженеру или предприятию для проводимых исследований.

Программный комплекс ANSYS в целом является неплохой разработкой, не уступающей по своим функциональным характеристикам другим рассматриваемым программам, данная программа способна поддерживать большое количество форматов файлов, в ней можно производить как стандартные исследования механических воздействий, так и специализированные, например анализы акустики и электромагнитного поля. Данная программа не получила большого распространения в нашей стране по ряду причин, например отсутствие русифицированного интерфейса и большая стоимость покупки лицензионного продукта. Рассматриваемый программный продукт используется в основном на зарубежных предприятиях, в частности, активными пользователями данной программы являются компании

NASA и SpaceX, использующие ее для проектирования космических аппаратов.

Программный продукт Nastran от компании Simens PLM Software является перспективным инструментом для различных инженерных исследований. Благодаря своим функциональным особенностям в области моделирования роторных машин, данная программная разработка в основном используется в приборостроении и машиностроении. В зарубежных государствах, в частности в США и Великобритании, данная среда является довольно-таки распространенным программным продуктом, часто используется в технических вузах для обучения студентов, а также получила большое распространение на небольших частных инженерных предприятиях. В России данная программа не нашла большого применения, хотя и имеет официальное представительство в нашей стране. Это связано с тем, что по функциональным характеристикам и основным проводимым анализам данная программа мало отличается от АСОНИКА или Creo, но при этом стоит в несколько раз больше них.

Заключение

В ходе проводимого исследования были рассмотрены такие программные среды, как Creo, SolidWorks, АСОНИКА, ANSYS и Nastran, представлены их основные характеристики и выявлены достоинства и недостатки. В ходе произведенного анализа было выявлено следующее: в отношении цена - качество наилучшими программами являются SolidWorks и АСОНИКА. Так, SolidWorks имеет наименьшую цену и немного урезанный функционал в сравнении со своими конкурентами, например, меньшее количество поддерживаемых систем исчислений. АСОНИКА имеет обширные функциональные возможности, позволяющие проводить большое количество анализов, а с учетом модульной структуры можно выбрать именно ту подпрограмму, которая необходима в данном исследовании. На третье место можно поставить программный комплекс Creo, несмотря на высокую стоимость лицензионного продукта, данный программный комплекс уже давно зарекомендовал себя и используется на многих предприятиях как в России, так и за рубежом. На последнее место можно поставить ANSYS и Nastran, по своим функциональным особенностям они мало отличаются от других программных про-

дуктов, но из-за высокой стоимости лицензии использует данные программы ограниченный круг зарубежных компаний. Для инженеров, занимающихся проектированием и разработкой новых устройств, можно порекомендовать программный комплекс Creo. Данная программа имеет обширный функционал, благодаря которому можно производить как стандартные исследования механических характеристик или тепловых анализов, так и специфические исследования. А благодаря своей средней цене приобрести её не составит труда. Данную рекомендацию подтверждает тот факт, что рассматриваемый программный продукт уже используется на многих предприятиях и зарекомендовал себя с наилучшей стороны.

Литература

1. Беккель Л.С., Сломинская Е.Н. Анализ возможностей CreoParametric // Инновационная наука. 2016. №9. С. 47 – 50.
2. Сравнение технологии формирования параметрических моделей механических конструкций в системах Creo и Компас: выпускная квалификационная работа ... бакалавр: 09.03.01 / Грачева Дарья Алексеевна; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина). СПб., 2017. 62 с.
3. Зиновьев Д. Основы моделирования в SolidWorks. М.: Vertex, 2017. 277 с.
4. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. Самоучитель SolidWorks 2007. СПб.: Изд-во БХВ-Петербург, 2007. 1308 с.
5. Бочков А.Л., Большаков В.П., Лячек Ю.Т. Твёрдотельное моделирование деталей в CAD-системах: AutoCAD, Компас-3D, SolidWorks, Inventor, Creo: учеб. пособие. СПб.: Изд-во «Питер», 2014. 480 с.
6. Шамулов А.С. Преимущества автоматизированной системы обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА перед зарубежными системами ANSYS, NASRAN, COSMOS, COMSOL и другими // Электроника и электротехника. 2018. №2. С. 40 – 45.
7. Шамулов А.С., Тихомиров М. Оценка надежности и качества РЭС // Электроника и электротехника. 2019. №1. С. 44 – 51.
8. Шамулов М.А., Шамулов А.С. Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. 87 с.
9. Шамулов А.С., Шамулов М.А. Опыт применения автоматизированной системы АСОНИКА в промышленности Российской Федерации: монография. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2017. 422 с.
10. Басов К.А. ANSYS и LMSVirtualLab. Геометрическое моделирование. М.: ДМК Пресс, 2006. С. 240.
11. Басов К.А. ANSYS для конструкторов. М.: ДМК Пресс, 2009. С. 248.
12. NX для конструктора-машиностроителя/П.С. Гончаров, М.Ю. Ельцов, С.Б. Коршиков, И.В. Лаптев, В.А. Осюк. М.: ИД ДМК Пресс, 2010. 504 с.

13. Матвеевский В.Р. Надёжность технических систем: учеб. пособие. М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2002. 113 с.

14. Кравченко Е.Г. Надёжность технических систем в машиностроении: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. 126 с.

15. Никитин Л.Н. Испытания, контроль и диагностика радиоэлектронной аппаратуры. Воронеж: ФГБОУ

ВПО "Воронежский государственный технический университет", 2009. 252 с.

16. Лячек Ю.Т. Геометрическое моделирование: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 63 с.

17. Зиновьев Д. Основы моделирования в КОМПАС-3DV17. М.: Vertex, 2017. 256 с.

Поступила 24.06.2020; принята к публикации 20.08.2020

Информация об авторах

Костюков Александр Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Гостев Михаил Юрьевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: gostev_mixail@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-8501>

Демикова Алеся Сергеевна - магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

Пирогова Юлия Александровна - магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: gvendilion@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4640-1902>

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE COMPLEXES FOR DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF RED

A.S. Kostyukov, A.V. Bashkirov, M.Yu. Gostev, A.S. Demikhova, Yu.A. Pirogova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: determining the reliability of the design of RED is the main task in the design process of new devices. Thanks to this operation, it is possible to select the actual material of the future design, as well as determine the nodal joints vulnerable to wear and damage. In connection with all the above, it is most promising to carry out these studies at the initial stages of device development, which will significantly save resources and time spent on design. Given all these goals, the issue of using specialized programs to determine the reliability of the design of radio equipment becomes relevant. These software products include Creo, SolidWorks, ASONIKA, ANSYS and Nastran about these software environments and will be discussed in this article. The article summarizes about each of the above programs, presents their main characteristics, advantages, and disadvantages. These software products are compared with each other by such an indicator as ease of use and the reliability of the data obtained when conducting a strength analysis of the design of RED. It is clearly shown how these programs are similar, and how they differ. At the end of the article, a comparative table is presented, according to which actual conclusions are made about the advantages and disadvantages of a particular program, and in what working conditions it is better to use each of the above described software media

Key words: Creo, SolidWorks, ASONIKA, ANSYS, Nastran, finite element mesh, strength analysis

References

1. Beckel L.S., Slominskaya E.N. "Analysis of the possibilities of Creo Parametric", *Innovative Science (Innovatsionnaya nauka)*, 2016, no. 9, pp. 47-50.
2. Gracheva D.A. "Comparison of the technology for the formation of parametric models of mechanical structures in Creo and Kompas systems" ("Sravnenie tekhnologii formirovaniya parametricheskikh modeley mekhanicheskikh konstruksiy v sistemakh Creo i Kompas"), Bachelor's final qualification work, 09.03.01, St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), 2017, 62 p.
3. Zinov'ev D. "Fundamentals of modeling in SolidWorks" ("Osnovy modelirovaniya v SolidWorks"), Moscow, Vertex, 2017, 277 p.
4. Dudareva N.Yu., Zagayko S.A. "Self-teacher SolidWorks 2007" ("Samouchitel' SolidWorks 2007"), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2007, 1308 p.
5. Bochkov A.L., Bolshakov V.P., Lyachek Yu.T. "Solid modeling of parts in CAD systems: AutoCAD, Compass-3D, SolidWorks, Inventor, Creo" ("Tverdotel'noe modelirovanie detaley v CAD-sistemakh: AutoCAD, Kompas-3D, SolidWorks, Inventor, Creo"), St. Petersburg, Piter, 2014, 480 p.
6. Shamulov A.S. "Advantages of the automated system for ensuring the reliability and quality of ASONIKA equipment over foreign systems ANSYS, NASRAN, COSMOS, COMSOL and others", *Electronics and Electrical Engineering (Elektronika i elektrotehnika)*, 2018, no. 2, pp. 40-45.

7. Shamulov A.S., Tikhomirov M. "Assessment of reliability and quality of RED", *Electronics and Electrical Engineering (Elektronika i elektrotehnika)*, 2019, no. 1, pp. 44-51.
8. Shamulov M.A., Shamulov A.S. "Virtual environment for designing RED based on integrated modeling of physical processes" ("Virtual'naya sreda proektirovaniya RES na osnove kompleksnogo modelirovaniya fizicheskikh protsessov"), Vladimir, Vladimir branch of RANEPА, 2016, 87 p.
9. Shamulov A.S., Shamulov M.A. "The experience of using the ASONIKA automated system in the industry of the Russian Federation" ("Opyt primeneniya avtomatizirovannoy sistemy ASONIKA v promyshlennosti Rossiyskoy Federatsii"), monograph, Vladimir: Vladimir branch of RANEPА, 2017, 422 p.
10. Basov K.A. "ANSYS and LMS Virtual Lab. Geometric modeling" ("ANSYS i LMSVirtualLab. Geometricheskoe modelirovanie"), Moscow, DMK Press, 2006, 240 p.
11. Basov K.A. "ANSYS for designers" ("ANSYS dlya konstruktorov"), Moscow, DMK Press, 2009, 248 p.
12. Goncharov P.S., El'tsov M.Yu., Korshikov S.B., Laptev I.V., Osiyuk V.A. "NX for the mechanical engineer" ("NX dlya konstruktora-mashinostroitel'ya"), Moscow, DMK Press, 2010, 504 p.
13. Matveevskiy V.R. "Reliability of technical systems: textbook" ("Nadozhnost' tekhnicheskikh sistem"), Moscow, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 2002, 113 p.
14. Kravchenko E.G. "Reliability of technical systems in mechanical engineering: textbook" ("Nadozhnost' tekhnicheskikh sistem v mashinostroenii"), Komsomolsk-on-Amur, KnASTU, 2014, 126 p.
15. Nikitin L.N. "Tests, control and diagnostics of electronic equipment" ("Ispytaniya, kontrol' i diagnostika radioelektronnoy apparatury"), Voronezh, Voronezh State Technical University, 2009, 252 p.
16. Lyachek Yu.T. "Geometric modeling" ("Geometricheskoe modelirovanie"), St. Petersburg, SPbSETU "LETI", 2016, 63 p.
17. Zinoviev D. "Fundamentals of modeling in KOMPAS-3D V17" ("Osnovy modelirovaniya v KOMPAS-3DV17"), Moscow, Vertex, 2017, 256 p.

Submitted 24.06.2020; revised 20.08.2020

Information about the authors

Aleksandr S. Kostyukov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Mikhail Yu. Gostev, MA, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: gostev mixail@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-8501>

Alesya S. Demikhova, MA, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

Yuliya A. Pirogova, MA, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: gvendilon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4640-1902>

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ МИКРОПОЛОСКОВОЙ ЛИНЗЫ РОТМАНА ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ

С.А. Антипов¹, В.Н. Кострова¹, Ю.Г. Пастернак^{1,2,3}, К.А. Разинкин¹,
М.А. Сиваш¹, В.И. Чугуевский¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

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

³АО «ИРКОС», г. Москва, Россия

Аннотация: исследуется геометрическая трансформация линзы Ротмана, которая позволяет уменьшить линейный габаритный размер на 50%. Приведены описание принципа работы линзы Ротмана и её схематическое изображение, также представлена модель до трансформации геометрии и после. При помощи средств численного электродинамического моделирования была проведена оценка характеристик исходной и модифицированной модели микрополосковой линзы Ротмана, представлены графики коэффициента стоячей волны по напряжению моделей исходной и трансформированной. Так, по полученным результатам показано, что трансформированная линза в целом обладает достаточно хорошим согласованием с питающей линией 50 Ом, а на некоторых частотных участках даже лучшее по сравнению с исходной моделью, расхождение коэффициента передачи в исследуемом диапазоне частот не превышает 0.2 Дб. У приведенных моделей разница фаз равняется 1°, такое значение объясняется увеличением электрической длины в модели из-за добавления участка, соединяющего два параллельных фазовых проводника. Сравнительный анализ полученных результатов в виде электрических параметров двух вариантов геометрии показал возможность успешной трансформации геометрии линзы Ротмана указанным способом для сокращения габаритных размеров

Ключевые слова: линза Ротмана, диаграммообразующие устройства, многолучевая связь, геометрия линзы

Введение

В настоящее время технологии беспроводной связи все чаще используют многолучевую передачу сигналов. Многолучевая передача сигналов позволяет повысить статистическую независимость сигналов, приходящих в точку приема, и используется для повышения пропускной способности и борьбы с интерференционными замираниями сигналов [1]. Для реализации многолучевой связи используются многолучевые антенные решетки, построенные на различных диаграммообразующих устройствах. Многолучевые антенные решетки (МАР) – это антенные решетки (АР), которые способны формировать в пространстве несколько парциальных диаграмм направленности. МАР в основном состоят из АР, у которых количество элементов N и диаграммообразующая схема (ДОС) с M количеством входов [12]. Известны различные способы построения многолучевых антенных решеток [2].

Линза Ротмана, предложенная Ротманом в 1961 году [3], и сейчас является актуальным диаграммообразующим устройством. Линзы

Ротмана могут работать в широкой и сверхширокой полосе частот, при этом осуществлять сканирование в секторе 90° с приемлемыми, с практической точки зрения, характеристиками [4,5]. В настоящее время наиболее массовое применение получила линза Ротмана, изготовленная по микрополосковой технологии. Многолучевые антенны, построенные на основе линзы Ротмана, широко применяются в современных телекоммуникационных системах [6-11].

Однако даже использование микрополосковых технологий зачастую не позволяет обеспечить достаточно жесткие конструктивные требования к антенной системе. Такие требования предъявляются для аппаратуры, размещаемой на подвижных носителях, и при использовании многолучевых антенн в составе многофункциональных комплексов связи, где каждой антенной системе выделяется ограниченный сектор размещения. В связи с этим актуальны исследования, направленные на сокращения габаритных размеров СВЧ-устройств, образующих антенные системы, особенно в дециметровом и сантиметровом диапазонах частот.

Принцип работы линзы Ротмана основан на различных траекториях распространения

волны внутри ее структуры. В линзе траектории распространения рассчитаны так, чтобы для различных портов возбуждения обеспечить на выходных портах линзы различный линейный сдвиг фазы. Как минимум, 3 фокальные точки имеют ЛР: в центре решетки возбуждения и в двух симметричных точках между центром и краем фокальной дуги [12]. На рис. 1 приведено схематическое изображение линзы Ротмана, поясняющее ее работу. Линза образуется двумя дугами, именуемыми дуга лучей и дуга решетки. На дуге лучей располагаются входные порты возбуждения (в режиме передачи), а на дуге решетки выходные порты. В линзе распространение волн осуществляется следующим образом: луч из первой фокальной точки F_1 , соответствующий входному порту, способен достигнуть плоскости фронта волны через точку $p(x,y)$, которая располагается на внутреннем контуре I_1 , $W(N)$ – фидерную линию, на внешнем контуре точку, а далее по прямой линии под $\angle -\alpha$ перейти во фронт волны, наклоненный на $\angle -\alpha$. Также луч от F_1 может пойти через центральную точку O_1 и через фидерную линию $W(0)$ попасть во фронт волны AB [12]. Таким образом, из вышеуказанного можно вычислить траекторию лучей, исходящих из других точек [12].

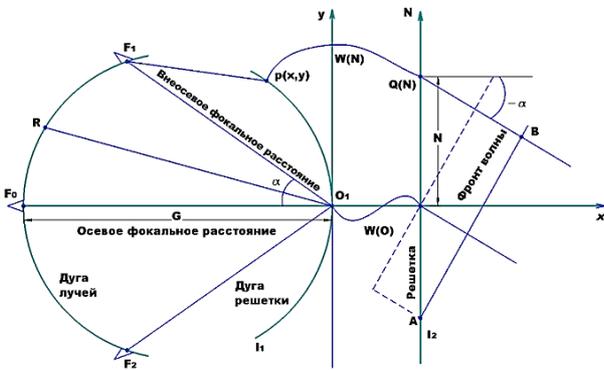


Рис. 1. Схематическое изображение линзы Ротмана

Используя конструкционные уравнения Ротмана-Тернера [3], можно выполнить расчет ЛР на основе математического моделирования и дальнейшую оптимизацию при помощи численного моделирования. Запишем эти уравнения:

$$\begin{aligned} F_1P + W(N) + N \cdot \sin \alpha &= F + W(0), \\ F_2P + W(N) - N \cdot \sin \alpha &= F + W(0), \\ F_0P + W(N) &= G + W(0), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} (F_1P)^2 &= (X + F \cdot \cos \alpha)^2 + (F \cdot \sin \alpha - Y)^2, \\ (F_2P)^2 &= (X + F \cdot \cos \alpha)^2 + (F \cdot \sin \alpha + Y)^2, \\ (F_0P)^2 &= (G + X)^2 + Y^2. \end{aligned}$$

Далее при помощи нормирования размеров линзы к внеосевому фокальному расстоянию упрощается расчет $F : x = X/F$, $y = Y/F$, $\eta = N/F$, $g = G/F$, $w = (W(N) - W(0))/F$, и обозначив: $a = \cos \alpha$, $b = \sin \alpha$, получаем:

$$\begin{aligned} y &= \eta(1 - w), \\ x^2 + Y^2 + 2gx &= w^2 - 2gw, \\ a_0w^2 + b_0w + c_0 &= 0, \end{aligned}$$

где
$$a_0 = 1 - \eta^2 - \left(\frac{g-1}{g-a_0}\right)^2,$$

$$b = \left[2g \left(\frac{g-1}{g-a_0}\right) - \left(\frac{g-1}{(g-a_0)^2}\right) b_0^2 \eta^2 + 2\eta^2 \right] - 2g,$$

$$c = \frac{g b_0^2 \eta^2}{g - a_0} - \frac{b_0^4 \eta^4}{4(g - a_0)^2} - \eta^2$$

При заданных параметрах конструкции линзы α и g имеется возможность рассчитать w как функцию η , следовательно, из полученных значений w и η можно определить x и y .

Результаты моделирования

Для исследования возможности сокращения габаритных размеров было реализовано математическое, а после численное моделирование ЛР на несимметричной полосковой линии с общим количеством портов 18×16 , которая работает в диапазоне частот 7-8,5 ГГц. На рис. 2 представлен общий вид модели ЛР.

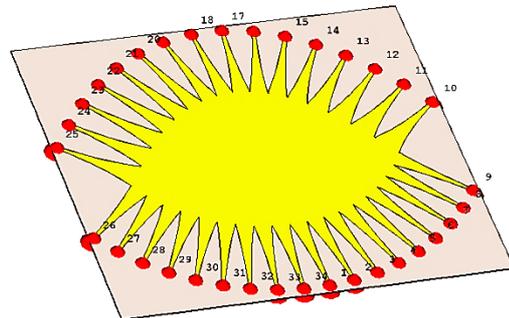


Рис. 2. Модель ЛР

Затем геометрия линзы была трансформирована: в поперечной плоскости сложением пополам, причем тело ЛР выполняет разворот на 180° , как приведено на рис. 3.

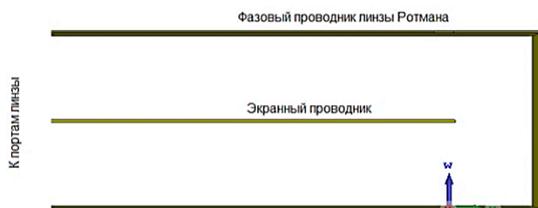


Рис. 3. ЛР (вид сбоку)

То есть сокращение линейного габаритно-го размера составляет порядка 50%. Полученная модель линзы представлена на рис. 4.

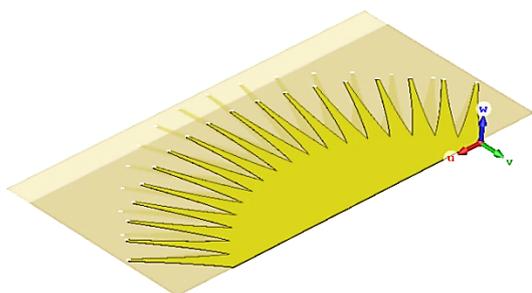


Рис. 4. Сложенная ЛР

При подобном размещении АР можно разместить перпендикулярно линзе либо подключить при помощи коаксиальных кабелей.

При помощи численного моделирования проведена оценка характеристик исходной и трансформированной моделей. На рис. 5 приведены графики КСВН портов центрального и крайнего.

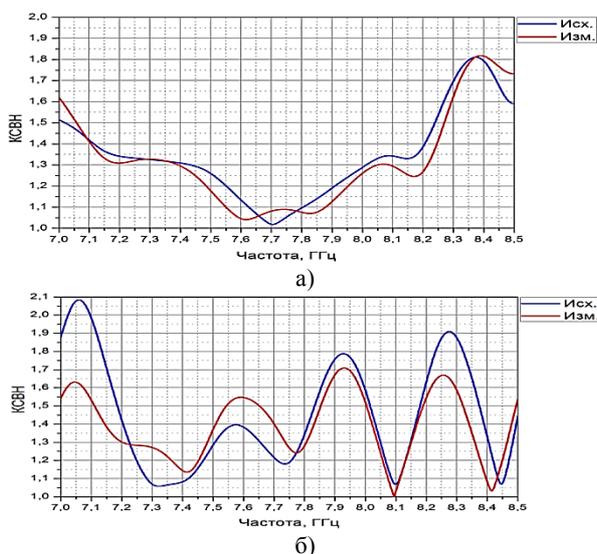


Рис. 5. КСВН исходной и трансформированной моделей:
а) КСВН центрального порта (X9),
б) КСВН крайнего порта (X1)

Как видно из рис. 5, в трансформированной линзе не обнаружено увеличения отражений от портов и в общем наблюдается доста-

точно хорошее согласование с питающей линией 50 Ом, и даже лучшее на некоторых частотных участках по сравнению с исходной моделью. В исследуемом диапазоне частот расхождение коэффициента передачи не превышает 0,2 дБ. На рис. 6 приведены фазовые характеристики исходной и трансформированных линз.

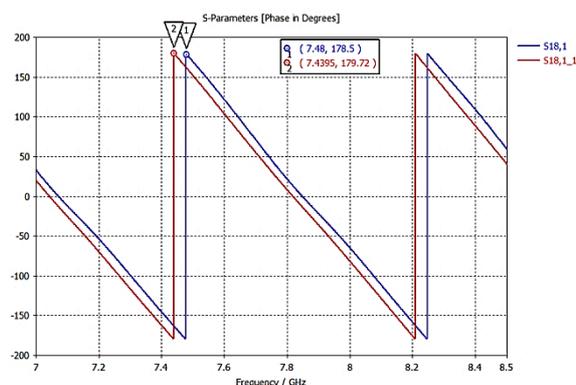


Рис. 6. Фазовая характеристика (S18,1 – исходная ЛР, S18,1_1 – ЛР с измененной геометрией)

Разница фаз у приведенных моделей 1° , это объясняется небольшим изменением, а точнее, увеличением электрической длины в модели из-за добавления участка, который соединяет два параллельных фазовых проводника. Фазовая картина поля в основном не искажается. Используя трехслойные печатные платы, технологически такие линзы можно изготовить. При этом переход между слоями реализуется массивом переходных металлизированных отверстий. Стоит отметить, что возможна трансформация ЛР и другими способами, что также весомерно не ухудшает характеристики ЛР. Исходя из полученных результатов исследования, можно сделать вывод о том, что трансформация ЛР приведенным способом не приводит к существенным ухудшениям ее характеристик и может быть использована при решении задач по компоновке и размещению ДОС в ограниченном объеме, занимаемом антенным устройством [12].

Заключение

В результате исследования получена электродинамическая модель линзы Ротмана с измененной геометрией и стабильными рабочими характеристиками. Проведенные численные расчеты показали возможность сокращения габаритного размера на 50 % при минимальном изменении параметров у прямой и

сложенной линз. При этом наблюдается эффект улучшения согласования, при незначительном ухудшении коэффициента передачи (не более 0,2 дБ для исследуемой модели). Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о перспективности данного способа геометрической трансформации линзы Ротмана для повышения компактности при размещении антенных систем на различных носителях.

Литература

1. Fei Hu. Opportunities in 5 G Networks: A research and Development Perspective. CRC Press, New York. 2016. 539 p.
2. Хансен Р.С. Фазированные антенные решётки. 2-е изд. М.: «Техносфера», 2012. 560 с.
3. Rotman W. and Turner R.F. Wide angle microwave lens for line source applications// IEEE Trans. Antennas Propag. 1963. AP-11. pp. 623–632
4. Archer D. Lens-fed multiple beam arrays// Microwave Journal. 1984. Vol. 27. pp. 171-172.
5. Singhal P.K., Gupta R.D., Sharma P.C. Recent trends in design and analysis of Rotman-type lens for multiple beamforming// International journal of RF and Microwave CAE 8. 1998. pp. 321-338
6. Rotman lens design and optimization for 5G applications/ S.E. Ershadi, A. Keshtkar, A. Bayat, A.H. Abdelrahman and H. Xin// International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2018. Vol. 10. Issue 9. pp. 1048-1057.
7. Rahimian A., Alomainy A. and Alfadhl Y. A flexible printed millimetre-wave beamforming network for WiGig and 5G wireless subsystems, 2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), Loughborough, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/LAPC.2016.7807565 [25].
8. Millimetre-wave beam-switching rotman lens antenna designs on multi-layered LCP substrates / Saily et al. //10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2016. pp. 1–5.
9. A Multibeam Antenna Based on Substrate Integrated Waveguide Technology for MIMO Wireless Communications / P. Chen, W. Hong, Z. Kuai, J. Xu, H. Wang, J. Chen, H. Tang, J. Zhou, K. Wu// IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57. Issue 6.
10. Rahimian A. Design and performance of a Ku-band Rotman Lens beamforming network for satellite systems// Progress In Electromagnetics Research M. 2013. Vol. 28. P.41–55
11. Вариант реализации многолучевой антенной решетки для диапазона частот 8-18 ГГц с диаграммообразующей схемой на основе печатной линзы Ротмана / А.В. Ашихмин, К.А. Быков, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Ю.А. Рембовский // Антенны. 2019. №2. С. 28-38.
12. Чугуевский В.И. Планарные антенные решетки для телекоммуникационных систем связи: дисс. ... канд. техн. наук. Воронежский государственный технический университет. Воронеж, 2019

Поступила 19.06.2020; принята к публикации 20.08.2020

Информация об авторах

- Антипов Сергей Анатольевич** – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)246-27-00, e-mail: antp54@mail.ru
- Кострова Вера Николаевна** – д-р техн. наук, профессор кафедры систем информационной безопасности, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-04, e-mail: kostrova_v@mail.ru
- Пастернак Юрий Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14); Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а); АО «Иркос» (129626, Россия, г. Москва, а/я 30), e-mail: pasternakvg@mail.ru
- Разинкин Константин Александрович** – д-р техн. наук, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kostyr@mail.ru
- Сиваш Михаил Александрович** – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: sivmikka@yandex.ru
- Чугуевский Виталий Игоревич** – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)246-27-00

RESEARCH OF GEOMETRIC TRANSFORMATION OF A ROTMAN MICROSTREAM LENS FOR REDUCING OVERALL DIMENSIONS

S.A. Antipov¹, V.N. Kostrova¹, Yu.G. Pasternak^{1,2,3}, K.A. Razinkin¹, M.A. Sivash¹, V.I. Chuguevskiy¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

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

³JSC «IRCOS», Moscow, Russia

Abstract: in this paper, we study the geometric transformation of the Rotman lens, which reduces the linear overall size by 50%. A description of the principle of operation of the Rotman lens and its schematic image is provided, as well as a model before the geometry transformation and after. With the help of numerical electrodynamic modeling, the characteristics of the original and modified model of the Rotman microstrip lens were evaluated, and graphs of the standing wave coefficient for the voltage of the original and transformed models were presented. So, according to the results obtained, it is shown that the transformed lens in general has a fairly good agreement with the supply line of 50 Ohms, and in some frequency sections even better than the original model, the difference in the transmission coefficient in the studied frequency range does not exceed 0.2 dB. For the above models, the phase difference is 1° , this value is explained by an increase in the electrical length in the model due to the addition of a section connecting two parallel phase conductors. A comparative analysis of the results obtained in the form of electrical parameters of two geometry variants showed the possibility of successful transformation of the Rotman lens geometry in this way to reduce the overall dimensions of the conductor. A comparative analysis of the results obtained in the form of electrical parameters of two geometry variants showed the possibility of successful transformation of the Rotman lens geometry in this way to reduce overall dimensions

Key words: Rotman lens, beamforming devices, multibeam communication, lens geometry

References

1. Fei Hu "Opportunities in 5 G networks: a research and development perspective", CRC Press, New York, 2016, 539 p.
2. Hansen R.S. "Phased antenna arrays" ("Fazirovannye antennnye reshetki"), Moscow, Tekhnosfera, 2012, 560 p.
3. Rotman W., Turner R.F. "Wide angle microwave lens for line source applications," *IEEE Trans. Antennas Propag. AP-11*, November 1963, pp. 623-632.
4. Archer D. "Lens-fed multiple beam arrays", *Microwave Journal*, 1984, vol. 27, pp. 171-172.
5. Singhal P.K., Gupta R.D., Sharma P.C. "Recent trends in design and analysis of Rotman-type lens for multiple beamforming", *International Journal of RF and Micro-wave CAE* 8, 1998, pp. 321-338.
6. Ershadi S.E. Keshtkar A., Bayat A., Abdelrahman A.H., Xin H. "Rotman lens design and optimization for 5G applications", *International Journal of Micro-wave and Wireless Technologies*, 2018, vol. 10, issue 9, pp. 1048-1057.
7. Rahimian A., Alomainy A., Alfadhl Y. "A flexible printed millimetre-wave beamforming network for WiGig and 5G wireless subsystems", *2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109 / LAPC.2016.7807565 [25].
8. Saily et al. "Millimetre-wave beam-switching Rotman lens antenna designs on multi-layered LCP substrates", *10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Apr. 2016, pp. 1-5.
9. Chen P., Hong W., Kuai Z., Wang H., Xu J., Chen J., Tang H., Zhou J., Wu K. "A multibeam antenna based on substrate integrated waveguide technology for MIMO wireless communications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, June 2009, vol. 57, issue 6.
10. Rahimian A. "Design and performance of a Ku-band Rotman Lens beamforming network for satellite systems", *Progress in Electromagnetics Research M*, 2013, vol. 28, 41-55.
11. Ashikhmin A.V., Bykov K.A., Pasternak Yu.G., Pershin P.V., Rembovskiy Yu.A. "Variant of implementation of a multi-beam antenna array for the frequency range 8-18 GHz with a diagram-forming circuit based on a printed circuit Rotman lenses", *Antennas (Antenny)*, 2019, no. 2, pp. 28-38.
12. Chuguev V.I. "Planar antenna arrays for telecommunication systems" ("Planarnye antennnye reshetki dlya telekommunikatsionnykh sistem svyazi"), Cand. of Tech. Sciences Diss., Voronezh State Technical University, Voronezh, 2019

Submitted 19.06.2020; revised 20.08.2020

Information about the authors

- Sergey A. Antipov**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: antp54@mail.ru
- Vera N. Kostrova**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kostrova_v@mail.ru
- Yuriy G. Pasternak**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), Leading Engineer of JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), Senior Researcher, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Sarykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru
- Konstantin A. Razinkin**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kostyr@mail.ru
- Mikhail A. Sivash**, student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: sivmikha@yandex.ru
- Vitaliy I. Chuguevskiy**, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.25987/VSTU.2020.16.4.018

УДК 621.01

**ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ АНИМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ****О.И. Попова¹, Г.С. Абдуллаев², Г.Э. Оруджева², Н.М. Сулейманова², Р.А. Юсифов²,
М.И. Попова¹, А.В. Демидов¹**¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**²**Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит, Азербайджан**

Аннотация: на основе анализа алгоритмических и программных средств создания графической информации для анимации механических частей промышленных роботов в автоматизированном производственном модуле определены цель и основные вопросы статьи. Для обеспечения производительности и эффективности технологических операций промышленного робота в робототехническом модуле были даны кинематическая схема размещения основных активных элементов и траектория движения руки промышленного робота. Методом Симпсона определена зона перемещения руки промышленного робота по эллипсоидной траектории. При использовании выражения для определения длины траектории движения промышленного робота установлены скорость и время, затраченное на технологическую операцию разгрузки автоматизированной транспортной системы. На этапе программного обеспечения создания анимации активных элементов робототехнического модуля реализуется разработанная математическая модель по определению длины траектории перемещения промышленного робота, координаты, скорости, а также минимального времени, затраченного на перемещение захвата промышленного робота, на основе которого осуществляются компьютерные эксперименты с исходными данными с помощью программного пакета на базе Delphi

Ключевые слова: анимация, промышленный робот, робототехнический модуль, кинематика, программа

Введение

Процесс автоматизированного проектирования стандартных элементов робототехнических комплексов, особенно на этапе эскизного проектирования из-за сложности конструктивных форм промышленных роботов, характеризуется вопросами математического моделирования основных кинематических, динамических и конструктивных параметров, конструкторского представления сборочных и отдельных чертежей промышленных роботов в двух-, трехмерных плоскостях, а также их анимационного моделирования. Рассмотренные ранее алгоритмы создания эскизного проекта с обработкой и управлением большого объема графической информации для анимации механических частей промышленного робота, технологического оборудования и других технических единиц [1, 2] в недостаточной степени обеспечивают решение точной компоновки их позиций, моделирования процесса управления робототехнического комплекса.

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка программного обеспечения для реализации трехмерного динамического представления промышленного робота (ПР) с контурной точностью его перемещения по траектории для обслуживания технологического оборудования и транспортера. Реализация поставленной цели осуществляется за счет решения задачи поэтапного создания алгоритмического и программного обеспечения анимации активных элементов робототехнического комплекса.

Результаты работы

На этапе математического обеспечения для анимации робототехнического модуля требуются решения вопросов по определению позиций ПР, технологического оборудования и транспортера, а также определения траектории движения ПР с учетом условий безопасности позиционирования и перемещения его руки. В этой связи, в 3-мерной координатной системе представляются позиции каждого элемента робототехнического модуля (РТМ) и дается чертеж траектории движения руки с захватным устройством ПР (рис. 1).

Как видно из рис. 1 между ПР и другими активными элементами (транспортёр и технологическим оборудование) в РТМ обеспечиваются безопасные расстояния $l_s \approx 1.2$ м – между ПР и транспортёром; $l_{min} \approx 1.5$ м – между ПР и технологическим оборудованием.

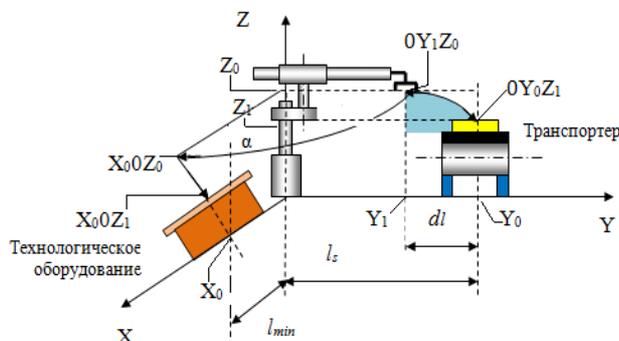


Рис. 1. Кинематическая схема размещения активных элементов РТМ и траектория движения ПР

Длина пути движения руки ПР по траектории эллипса (рис. 1), которая получена на основе экспериментальных исходных параметров захвата руки промышленного робота (исходное положение захвата ПР соответственно по осям Y и Z: $Y=0.7$ м., $Z=0.2$ м.), можно определить по формуле [3]:

$$l = (y_0 - y_1) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - c^2 \cos^2 p} dp, \quad (1)$$

где $c = \frac{\sqrt{(y_0 - y_1)^2 - (z_1 - z_0)^2}}{(y_0 - y_1)} < 1$,

p – фокальный параметр эллипса - отрезок, который выходит из фокуса эллипса и перпендикулярный большой полуоси:

Интеграл (1) вычисляется приближенным методом Симпсона. Время, затраченное на траекторию с учетом результирующей скорости

$$|V| = V_z \sqrt{\frac{(y_0 - y_1)^4 (z - z_0)^2}{(z_0 - z_1)^4 (y - y_0)^2} + 1}.$$

и (1) записывается в виде:

$$t = \frac{(y_0 - y_1) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - c^2 \cos^2 p} dp}{V_z \sqrt{\frac{(y_0 - y_1)^4 (z - z_0)^2}{(z_0 - z_1)^4 (y - y_0)^2} + 1}} \quad (2)$$

Из позиции $M_1(O, Y_1, Z_1)$ рука промышленного робота, вращаясь на 90^0 , переходит в точку $M_2(X_1, O, Z_1)$ координатной системы

XOZ . Тогда уравнение перемещения точки $M_1(O, Y_1, Z_1)$ записывается в виде:

$$\begin{aligned} x &= x' \cos \alpha_1 + y' \cos \alpha_2 + z' \cos \alpha_3 \\ y &= x' \cos \beta_1 + y' \cos \beta_2 + z' \cos \beta_3 \\ z &= x' \cos \gamma_1 + y' \cos \gamma_2 + z' \cos \gamma_3 \end{aligned}, \quad (3)$$

где x, y, z и x', y', z' — координаты точки M соответственно в старой и новой (вращательной) системах координат.

Чтобы выразить x, y, z через x', y', z' введена вспомогательная система координат x_1Oy_1 , начало которой находится в начале O, а направления осей совпадает с направлениями старых осей.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ - углы между неподвижными и вращательными единичными векторами. Эти углы имеют следующие значения:

	i'	j'	k'
i	$\frac{\pi}{2}$	0	$\frac{\pi}{2}$
j	π	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
k	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0

где i, j, k - единичные векторы неподвижной системы; i', j', k' - единичные векторы вращательной системы.

После подстановки значений углов, координаты x, y, z будут иметь вид:

$$x = y'; \quad y = -x'; \quad z = z' \quad (4)$$

Длина дуги, которую описывает рука ПР при вращении из точки $M_1(O, y_1, z_1)$, определяется в виде:

$$l_1 = \frac{\pi}{2} y_1 = \frac{\pi}{2} r_0 \cos \varphi_{10} \operatorname{tg} \varphi_{20}, \quad (5)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{20} = \frac{Z_1}{y_1}$.

Время, затраченное на путь вращательного движения вокруг оси Z, определяется в виде:

$$t_1 = \frac{l_1}{V_1} = \frac{\pi r_0 \cos \varphi_{10} \operatorname{tg} \varphi_{20}}{2V_1}, \quad (6)$$

где V_1 - вращательная скорость руки ПР, которая выбирается из справочника.

После вращательного движения вокруг оси Z из точки $M_2(x_1, O, z_1)$, рука ПР перемещается по траектории эллипса в точку $M_3(x_2, O, z_0)$. Пролетанный путь l_2 в координатной системе (X, O, Z) соответствует пути в координатной системе (O, Y, Z) , т.е. $l = l_2$. Соответственно время t_2 , затраченное на путь l_2 , также будет соответствовать t , т.е. $t_2 = t$.

Общее время, затраченное на путь из точки $M(O, y_0, z_0)$ до точки $M_4(x_2, 0, z_0)$, будет:

$$t_{об} = 2t + t_1. \quad (7)$$

С учетом (2) и (6):

$$t_{об} = \frac{2(y_0 - y_1) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - c^2 \cos^2 p} dp}{V_1 \sqrt{\frac{(y_0 - y_1)^2 (z - z_0)^2}{(z_0 - z_1)^2 (y - y_0)^2} + 1}} + \frac{\pi r_0 \cos \phi_{10} \operatorname{tg} \phi_{20}}{2V_1}$$

Для точного расчета траектории $C(t)$ перемещения ПР при виртуальном моделировании используется функция построения кривой в форме эквидистанты $C^a(t)$. При определении геометрической формы эквидистантной кривой на ней могут образовываться петли (точки излома на рис. 2). Существует два типа петель:

локальные и глобальные. Точка эквидистанты располагается внутри локальной петли, в том случае, если в соответствующей ей точке обрабатываемой кривой радиус кривизны меньше величины смещения эквидистантой линии [4]. Возможный случай возникновения локальной петли изображен на рис. 2.

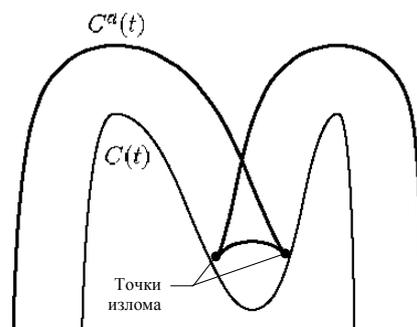


Рис. 2. Образование локальной петли

На рис. 3 показана процессная модель формирования фрагментов рабочих ходов ПР. На вход блока поступает геометрическая модель траектории движения руки с захватным устройством ПР. Остальные исходные данные, необходимые для расчета, определяются пользователем в интерактивном режиме работы с системой.

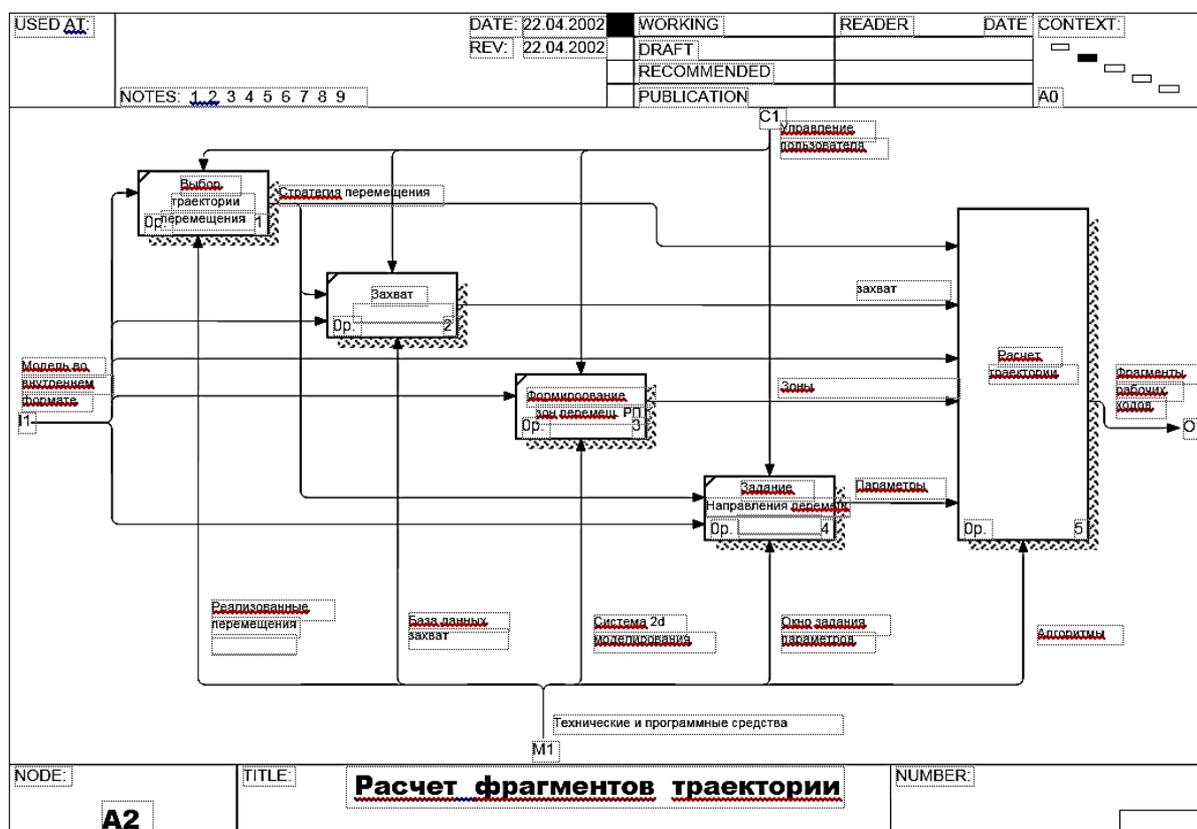


Рис. 3. Процессная модель расчета траектории ПР

Таким образом, полученный результат позволяет определить, что время, затраченное на путь траектории эллипса, меньше на $20 \div 25\%$, чем суммарно затраченное время на прямолинейное перемещение руки ПР по ломанной линии [5]. Соответственно в предложенной траектории ПР затрачивается меньше времени на один цикл движения руки ПР и повышается при этом производительность робототехнического модуля.

На этапе программного обеспечения создания анимации активных элементов робототехнического модуля реализуются разработанные выше математические модели по определению их обобщенных координат, скорости, а также минимального времени, затраченного на перемещение захвата промышленного робота, экспериментируя исходными данными с помощью программного пакета, автоматизируется процесс выбора требуемой траектории [6].

На данном этапе на основе выбранного алгоритма перемещения руки промышленного робота на базе программной системы Delphi разрабатывается программный пакет анимации промышленного робота, обслуживающий АТС и технологическое оборудование. Программно-анимационное представление активных элементов гибкого производственного модуля предусматривает последовательное перемещение детали по АТС, захват детали захватным устройством промышленного робота, перемещение руки ПР одновременно по поступательным и вращательным направлениям. При одновременном получении движения руки ПР линейного и углового перемещения его захват в пространстве перемещается по траектории эллипса.

В программно-анимационном пакете применяются блоки управления и ввода параметров движения ПР. В блоке управления, задавая координаты и время перемещения захвата руки ПР по установленной траектории, можно обеспечить автоматизированное управление анимационного движения руки ПР в робототехническом модуле.

В блоке ввода параметров движения ПР используются разделы обучения перемещения руки ПР; сцена захвата детали и перемещения руки ПР; масштаб анимационного представления технологических операций ПР; направляющие блоки для перемещения детали и ПР. С помощью блока обучения, задавая перемещения детали и руки ПР, в памяти сохраняются текущие анимационные ситуации технологических операций. Фрагменты анимационного

представления захвата ПР заготовки из автоматической транспортной системы и перемещения его по эллипсоидной траектории показаны на рис. 4.

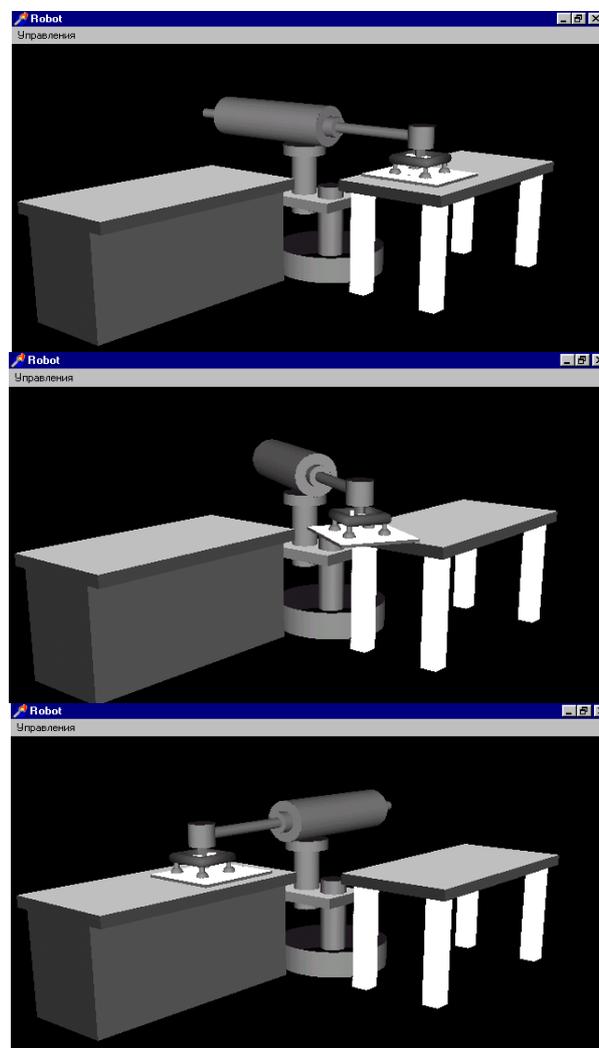


Рис. 4. Фрагменты анимации робототехнического модуля

Заключение

В соответствии с компоновкой активных элементов робототехнического модуля определена эллипсоидная траектория перемещения руки ПР с показателями ее скорости и времени движения.

Разработано программное обеспечение для анимационного представления перемещения руки ПР в робототехническом модуле.

Литература

1. Чуприн А.И. AutoCAD 2002. Трехмерное проектирование. Лекции и упражнения. М.: Dia Soft, 2003, 235 с.

2. eM-Workplace, Solidworks среда цифрового 3D-моделирования роботизированных ячеек. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.solidworks.ru>

3. Мамедов Дж.Ф. Математическая модель выбора компоновки оборудования гибкого производственного модуля. Изв. АНА. Серия физико-техн. мат. наук. Т. XX. № 2. 2004. С. 263-265.

4. Формирование траектории перемещения режущего инструмента в САМ-системе при автоматизированном проектировании фрезерной обработки сложнопрофильной детали / Попова О.И., Демидов А.В., Попова М.И., Чумарный В.П., Грошев А.В. // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 16. № 1. 2020. С. 132-138.

5. Макаров И.М. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств. М.: Робототехника и гибкие автоматизированные производства, Высшая школа, 2006. Т. 5. 175 с.

6. Артамонов Е.И. Этапы и тенденции развития программного обеспечения систем автоматизированного проектирования // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. CAD/CAM/PDM-2001: материалы конференции и выставки. М.: ИПУ РАН, 2001. С. 259-260.

Поступила 01.07.2020; принята к публикации 21.08.2020

Информация об авторах

Попова Ольга Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: olga_10_popova@mail.ru

Абдуллаев Гурбан Садых оглу – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой метрологии и стандартизации, Сумгаитский государственный университет (5008, Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал, 1-й корпус), e-mail: abdullayev.qs@bk.ru

Оруджева Гюльшан Эльшад гызы – ассистент кафедры информационных технологий и программирования, Сумгаитский государственный университет (5008, Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал, 1-й корпус), e-mail: ogucovagulsen1975@mail.ru

Сулейманова Набат Мурсал гызы – канд. техн. наук, доцент кафедры гражданской обороны, медицинской и физической подготовки, Сумгаитский государственный университет (5008, Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал, 1-й корпус), e-mail: abdullayev.qs@bk.ru

Юсифов Рамин Аслан оглу – докторант кафедры электромеханики, Сумгаитский государственный университет (5008, Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал, 1-й корпус), e-mail: cavan62@mail.ru

Попова Маргарита Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vip.popovamargarita@mail.ru

Демидов Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: dontray@mail.ru

STAGES OF DEVELOPMENT OF ANIMATION SUPPORT OF ROBOTIC MODULE

O.I. Popova¹, G.S. Abdullaev², G.E. Orudzheva², N.M. Suleymanova², R.A. Yusifov², M.I. Popova¹, A.V. Demidov¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan

Abstract: based on the analysis of algorithmic and software tools for creating graphical information for animating the mechanical parts of industrial robots in an automated production module, the purpose and main issues of the article are determined. To ensure the productivity and efficiency of technological operations of an industrial robot in a robotic module, a kinematic layout of the main active elements and the trajectory of the arm of an industrial robot were given. The Simpson method determines the zone of movement of the industrial robot arm along an ellipsoidal path. Using the expression to determine the length of the trajectory of the industrial robot, the speed and time spent on the technological operation of unloading an automated transport system are determined. At the stage of the software for creating animations of the active elements of the robotic module, the above developed mathematical model is implemented to determine the length of the trajectory of the industrial robot, coordinate, speed, and the minimum time spent moving the capture of the industrial robot, on the basis of which computer experiments are carried out with the initial data using software package based on Delphi

Key words: animation, industrial robot, robotic module, kinematics, program

References

1. Chuprin A.I. "AutoCAD 2002. Three-dimensional design. Lectures and exercises" ("AutoCAD 2002. Trekhmernoe proektirovanie. Lektsii i uprazhneniya"), Moscow, Dia Soft, 2003, 235 p.
2. "eM-Workplace", environment for digital 3D-modeling of robotic, available at: <http://www.solidworks.ru>
3. Mamedov J.F. "Mathematical model for the selection of equipment layout of a flexible production module", *Izv. ANA. Series of Physical and Technical. Mat. Sciences (Izv. ANA. Seriya fiziko-tekhn. mat. nauk.)*, Baku, 2004, vol. XX, No. 2, pp. 263-265.

4. Popova O.I., Demidov A.V., Popova M.I., Chumarnyy V.P., Groshev A.V. "The formation of the path of movement of the cutting tool in the CAM system with the automated design of milling processing of a complex part", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 132-138.

5. Makarov I.M. "Modeling of robotic systems and flexible automated production" ("Modelirovanie robototekhnicheskikh sistem i gibkikh avtomatizirovannykh proizvodstv"), Moscow, Robotics and Flexible Automated Production, Vysshaya shkola, 2006, vol. 5.

6. Artamonov E.I. "Stages and development trends of software for computer-aided design systems", *Proc. of the Conference and Exhibition "Design Systems, Technological Preparation of Production and Management of the Stages of the Life Cycle of an Industrial Product. CAD / CAM / PDM-2001" (Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta. CAD/CAM/PDM-2001: materialy konferentsii i vystavki)*, Moscow, IPU RAN, 2001, pp. 259-260.

Submitted 01.07.2020; revised 21.08.2020

Information about the authors

Ol'ga I. Popova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: olga_10_popova@mail.ru

Gurban S. oglu Abdullaev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Metrology and Standardization, Sumgait State University (1st building of SSU, 43rd quarter, Sumgait, Az 5008, Azerbaijan), e-mail: abdullayev.qs@bk.ru

Gulshan E. gizi Orudzheva, Assistant, Sumgait State University (1st building of SSU, 43rd quarter, Sumgait, Az 5008, Azerbaijan), e-mail: orucovagulsen1975@mail.ru

Nabat M. gizi Suleymanova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Sumgait State University (1st building of SSU, 43rd quarter, Sumgait, Az 5008, Azerbaijan), e-mail: abdullayev.qs@bk.ru

Ramin A. oglu Yusifov, Doctoral student, Sumgait State University (1st building of SSU, 43rd quarter, Sumgait, Az 5008, Azerbaijan), e-mail: cavan62@mail.ru

Margarita I. Popova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vip.popovamargarita@mail.ru

Aleksey V. Demidov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: dontcray@mail.ru

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО
ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА, ИЗГОТАВЛИВАЕМОГО АДДИТИВНЫМ МЕТОДОМ****Е.В. Смоленцев¹, В.В. Куц², М.С. Разумов², Д.Е. Крохин¹**¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация: рассматриваются вопросы технологии электрохимической обработки металлов, основанной на использовании явления анодного растворения. Одним из факторов, ограничивающих область рационального использования электрохимической обработки, является сравнительная сложность изготовления электрода-инструмента. Во многом это обусловлено тем, что конструкция электродов-инструментов для электрохимической обработки металлов должна обеспечить постоянную равномерную подачу рабочей токопроводящей жидкости на участки, где будет происходить обработка. При изготовлении электродов-инструментов сложной формы для электрохимической обработки требуется широкая номенклатура дорогостоящего оборудования, а затраты на процесс могут превышать себестоимость изготовления детали. Решением данной проблемы является использование возможностей систем автоматизированного проектирования и аддитивных технологий, позволяющих реализовать принципиально новые элементы конструкции инструментов, исключая при этом необходимость ряда ресурсоемких операций, выполняемых на дорогостоящем оборудовании. Отличительной особенностью данного решения является то, что корпус электрода-инструмента изготавливается из пластика, обладающего диэлектрическими свойствами, внутри которого и на отдельных участках его поверхности размещаются токопроводящие каналы, слои из токопроводящего пластика, на наружную поверхность которых наносится слой гальванического медного покрытия. Для изготовления данного электрода-инструмента была разработана специальная конструкция 3D-принтера с дополнительной поворотной горизонтальной осью и тремя позициями для установки двух экструдеров (один с установленным ABS-пластиком, второй с токопроводящим) и специальной насадкой для нанесения медного гальванического покрытия. Применение данного 3D-принтера и разработанного программного обеспечения позволило осуществить аддитивное формообразование комбинированного электрода-инструмента. Предложенный авторами подход к проектированию комбинированных ЭИ, в том числе и сложной формы, позволяет существенно снизить стоимость используемых для его изготовления материалов и реализовать впоследствии процесс его изготовления аддитивными методами без использования широкой номенклатуры дорогостоящего оборудования, что позволит также снизить себестоимость его изготовления

Ключевые слова: электрохимическая обработка, аддитивные технологии, электрод, гальваническое покрытие

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта №19-38-50076

Введение

Технология электрохимической обработки металлов основана на использовании явления анодного растворения. Металл на поверхности анода (обрабатываемой заготовки) растворяется под действием электромагнитных полей в токопроводящей среде без непосредственного контакта между деталью и инструментом. Данная технология имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными лезвийными методами обработки, например: высокая производительность обработки вне зависимости от твердости материала заготовки, возможность получения различной геометрии с высокой чистотой, обработка поверхностей и полостей в деталях, доступ в которые инструментом для механической обработки невозможен. Кроме

того, электрохимическая обработка позволяет исключить операции, требующие ручного труда (слесарные операции по удалению заусенцев, скруглению кромок), что позволяет повысить качество продукции и снизить трудозатраты.

Постановка задачи

Одним из факторов, ограничивающих область рационального использования электрохимической обработки, является сравнительная сложность изготовления электрода-инструмента, особенно в случае, когда он используется для формообразования деталей со сложным профилем, глубокими отверстиями с переменным диаметром, криволинейной осью. Для таких изделий конструкция электрода-инструмента часто является нетехнологичной и ее изготовление невозможно традиционными методами лезвийной обработки.

Во многом это обусловлено тем, что конструкция электродов-инструментов для ЭХО должна, в том числе обеспечивать постоянную равномерную подачу рабочей токопроводящей жидкости на участки, где будет происходить обработка. Для этого в конструкции электродов предусматриваются канавки, щели, отверстия для подвода электролита. Один из примеров схемы реализации электрохимической обработки показан на рис. 1.

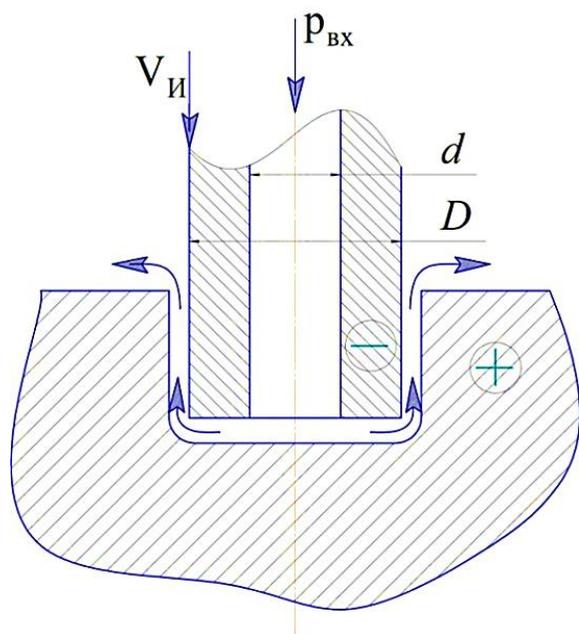


Рис. 1. Схема ЭХО с прямой подачей электролита:

$V_{и}$ – скорость подачи электрода-инструмента;
 $P_{вх}$ – подача электролита под давлением; D – диаметр рабочей части электрода – инструмента; d – диаметр канала для подвода электролита в зону обработки

Физические и химические свойства электролита, а также характер его протекания в зоне обработки оказывают значительное влияние на такие показатели, как производительность, шероховатость, точность, качество поверхностного слоя. В связи с этим при конструировании электродов к щелям и отверстиям в них предъявляется большое число требований [1], например, касающихся длины путей прохождения электролита, расположения мест подвода электролита, их взаимного положения. Выполнение всех этих требований позволяет достичь снижения погрешности обработки до 1-2 мкм [2], однако формообразование таких элементов традиционными субтрактивными технологиями либо требует слишком высоких затрат ресурсов, либо, в ряде случаев, невозможно.

Как известно [3], такие технологические показатели обработки, как качество обработки,

точность и производительность являются на практике взаимоисключающими в случае попытки одновременно их повысить в рамках одной операции. Тем не менее в случае дискретного управления параметрами и способом подачи электролита в зону обработки, можно достичь ощутимого прироста (или сохранения значений на приемлемом уровне) по каждому из них при ЭХО. Так, например, формируя в ЭИ каналы для удаления газообразных продуктов обработки можно устранить негативный эффект от наводороживания поверхности, стабилизировать процесс анодного растворения металла, снизить погрешность обработки в несколько раз [1]. Варьируя форму каналов можно реализовать попеременно ламинарный и турбулентные характеры протекания рабочей среды. В первом случае будут достигнуты стабильность и качество обработки, во втором – ускоренное удаление продуктов из межэлектродного зазора. Концентрация, состав и температура электролита могут изменять производительность обработки на порядок, влияют на точность формируемой поверхности, поэтому подвод различающихся по вышеуказанным параметрам рабочих жидкостей к различным участкам детали может открыть новые возможности повышения технологических показателей, особенно в случае обработки биметаллов, широко используемых, например, при производстве аэрокосмической техники. Также возможно за счет формирования геометрии каналов для подвода электролита достижение скорости протекания электролита на всех участках обработки со значениями, обеспечивающими вынос металло- и газосодержащих продуктов обработки, что обеспечит повышение технологических показателей.

Методы исследования, результаты

При проектировании электродов-инструментов придерживаются следующей последовательности. Вначале рассчитывают форму рабочей поверхности и положение каналов для подвода рабочей среды к обрабатываемым участкам заготовки. При определении формы рабочей части инструмента исходят из поверхности, эквидистантной обрабатываемому контуру, корректируя ее по различным методикам до действительной. Наиболее распространены следующие методы корректировки: аналитический, моделирования электрическим полем и производственный. Первыми двумя методами затруднительно учитывать

такие факторы, как гидродинамика рабочей среды, варьирование ее температуры и концентрации в процессе обработки, что снижает качество изготовления деталей. Поэтому более распространен третий, производственный метод [4].

Изготовление электродов инструментов сложной формы по сложившейся технологии ведется в следующей последовательности:

По известным методикам [4] рассчитывают и изготавливают мастер-шаблоны с профилем, обратным эквидистантным рабочей части электрода-инструмента.

1. По мастер-шаблонам изготавливают литейные формы, затем отливают по ним заготовку, в том случае, если необходимо выполнить в ней каналы для подвода электролита.

2. С помощью субтрактивных технологий формируют окончательную геометрию электрода-инструмента для электрохимической обработки.

Обобщенная технология изготовления электродов-инструментов для ЭХО показана на рис. 3 [5].

Из вышесказанного очевидно, что для изготовления инструментов сложной формы для электрохимической обработки требуется широкая номенклатура дорогостоящего оборудования, а затраты на процесс могут превышать себестоимость изготовления детали. Очевидно, что применительно к единичному производству масштабы затрат вырастают на порядок. При этом в любом случае не гарантируется реализация дискретного управления параметрами и способом подачи электролита в зону обработки, которыми, как было сказано выше, можно достичь значительного повышения технологических показателей обработки.

Решением данной проблемы является использование возможностей систем автоматизированного проектирования и аддитивных технологий, позволяющих реализовать принципиально новые элементы конструкции инструментов, исключая при этом необходимость ряда ресурсоемких операций, выполняемых на дорогостоящем оборудовании.

На рис. 2 показаны эскиз и 3D-модель электрода-инструмента для удаления заусенцев в отверстиях, имеющих традиционную

конструкцию. Основа электрода-инструмента представляет собой цельную конструкцию, изготавливаемую из меди, на которую для формирования токонепроводящих участков наносится слой диэлектрика - капрона.

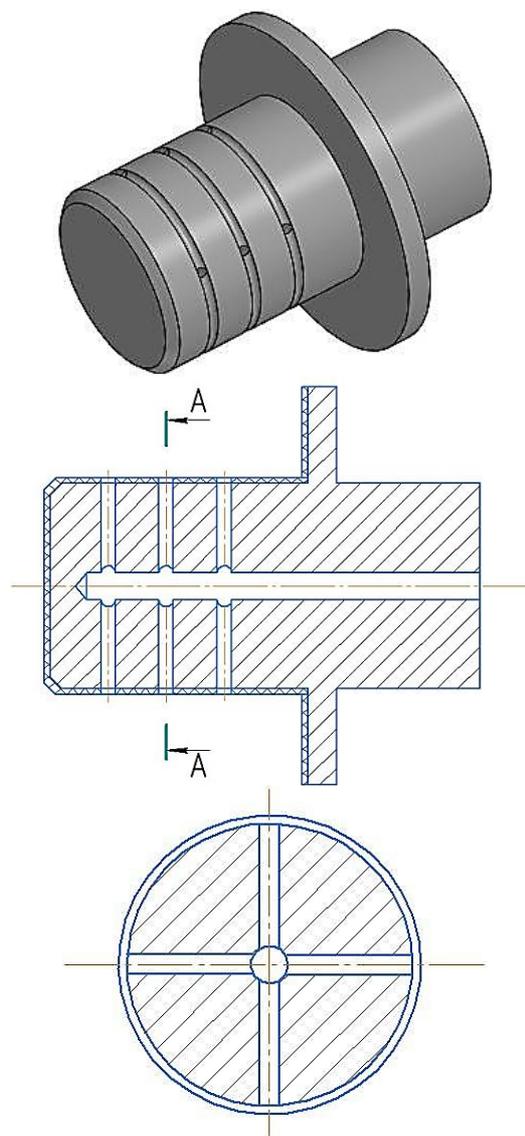


Рис. 2. Традиционная конструкция электрода-инструмента

Для обеспечения возможности изготовления электрода-инструмента аддитивным способом и уменьшения его стоимости была предложена новая конструкция, представленная на рис. 4.

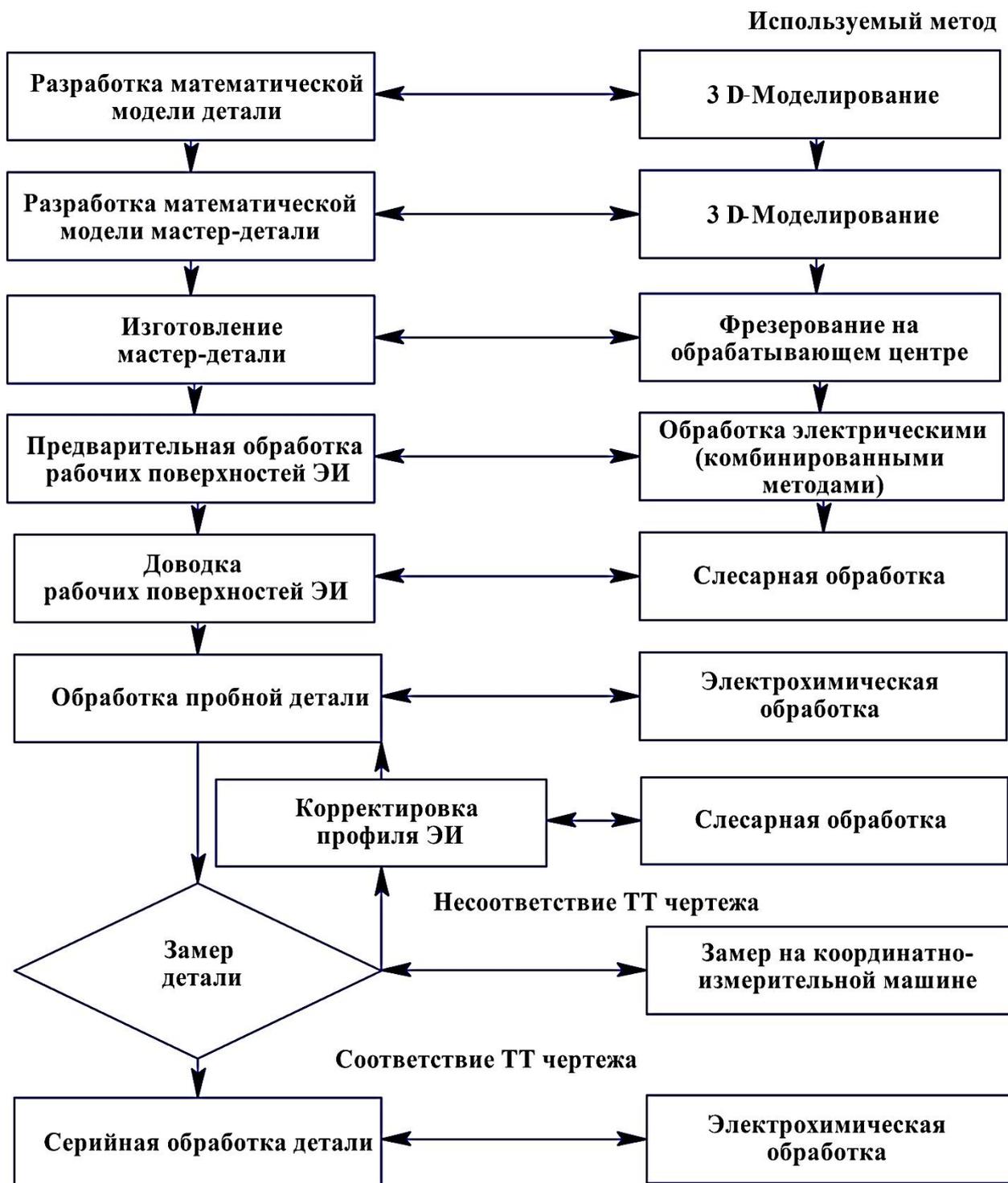


Рис. 3. Обобщенная технология изготовления электродов-инструментов для ЭХО

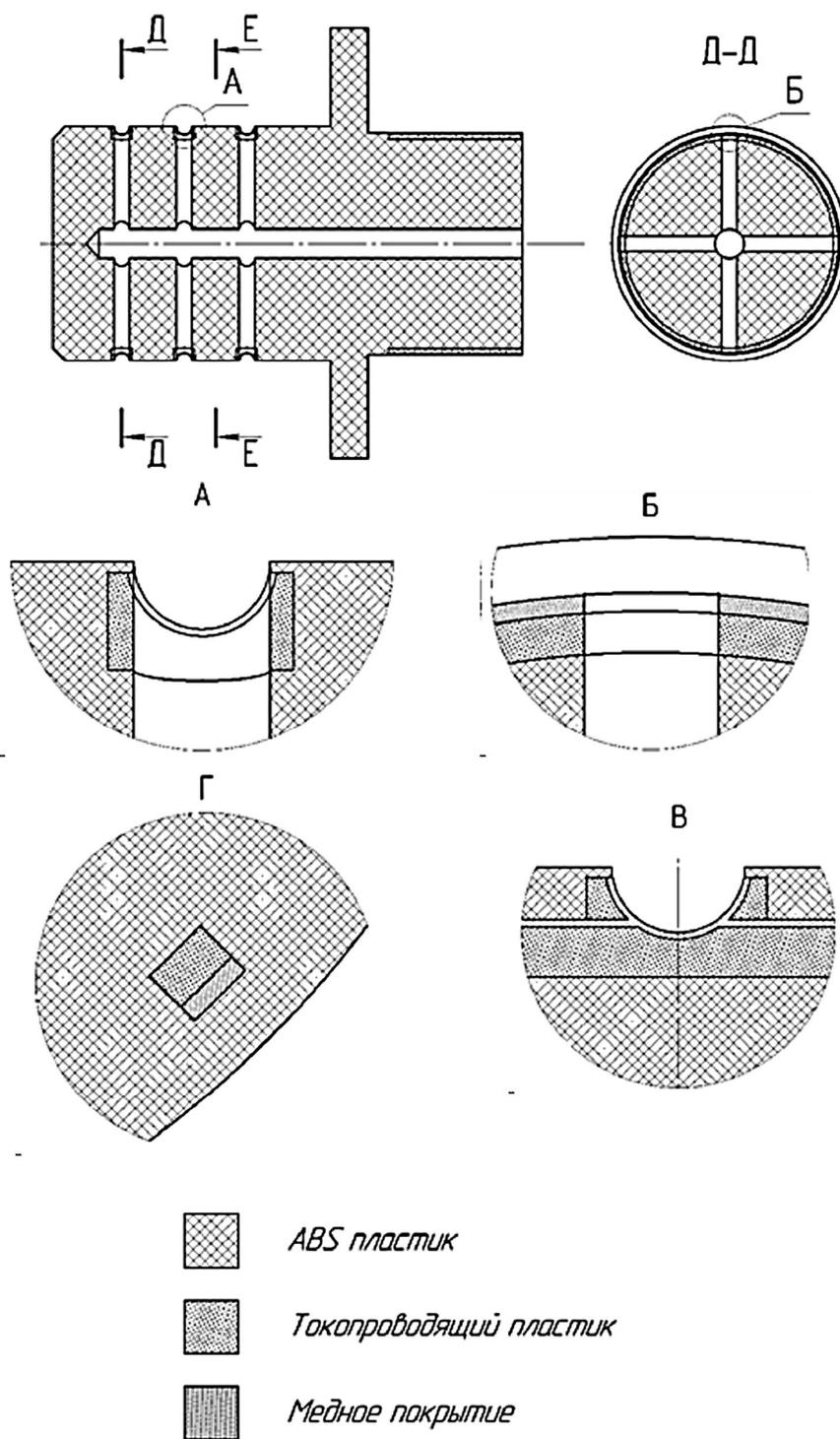


Рис. 4. Конструкция комбинированного электрода-инструмента

Её отличительной особенностью является то, что корпус электрода-инструмента изготавливается из пластика, обладающего диэлектрическими свойствами, внутри которого и на отдельных участках его поверхности размещаются токопроводящие каналы, слои из токопроводящего пластика, на наружную поверхность которых наносится слой гальвани-

ческого медного покрытия (см. рис. 4). В данном случае слои токопроводящего пластика используются в качестве основы для нанесения гальванического медного покрытия, что позволит повысить токопроводность на участках электрода-инструмента, непосредственно участвующих в процессе электрохимического растворения заусенцев. Таким образом, для

изготовления ЭИ аддитивным методом необходимо построить отдельные модели частей электрода, изготавливаемых из ABS пластика и изготавливаемых из токопроводящего пластика, наружная поверхность которого будет покрываться слоем меди (рис. 5).

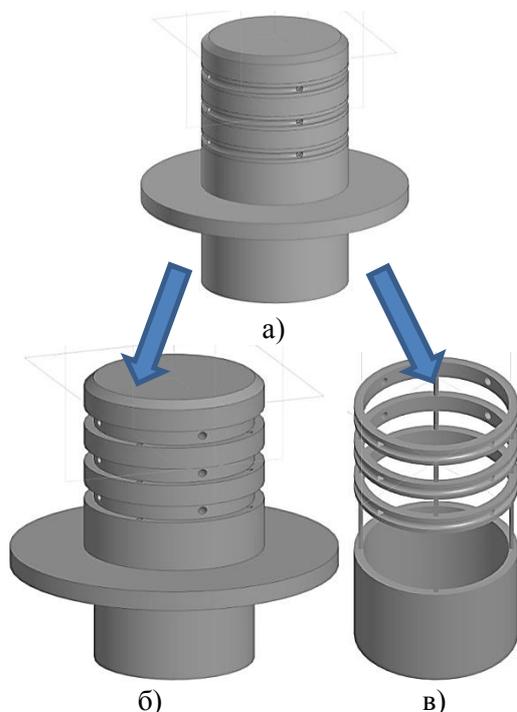


Рис. 5. Структура комбинированного электрода-инструмента:
 а) сборная модель комбинированного ЭИ;
 б) часть модели, изготавливаемая из ABS пластика;
 в) часть модели, изготавливаемая из токопроводящего пластика

Для нанесения локального гальванического медного покрытия на аддитивном оборудовании была разработана специальная насадка, устанавливаемая на позиции дополнительного экструдера в 3D-принтере (рис. 6).

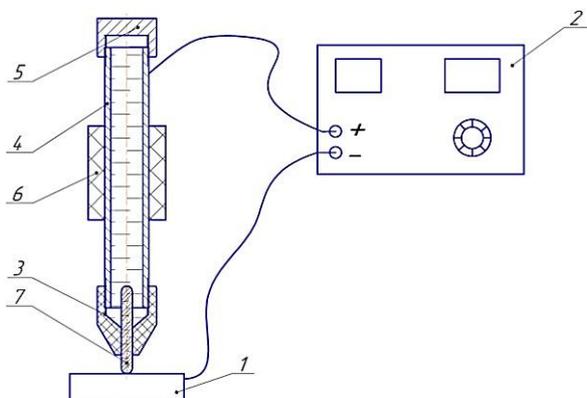


Рис. 6. Насадка для нанесения локального гальванического покрытия с использованием 3D-принтера

Насадка представляет собой корпус, состоящий из медной трубки 4, которая выполняет роль анода, поскольку к ней подключается плюс от источника питания 2, и имеет гайку 5 и насадку 3, в полости которой находится электролит. Гайка 5 имеет резьбу и накручивается на медную трубку 4, что позволяет доливать электролит при надобности. Насадка 3 накручивается на нижнюю часть медной трубки и имеет пористый стержень 7, который пропитывается электролитом и выступает в качестве носителя электролита, позволяя взаимодействовать с деталью 1, которая является катодом, поскольку подключена к отрицательной клемме источника питания 2. Причем размер и пористость стержня 7 подбираются из учета толщины наносимого единичного слоя. Таким образом, обеспечивается нанесение ионов меди на заготовку из электролита, и пополнения ионов меди в электролит с поверхности медной трубки. Кольцо 6 выполнено из диэлектрика и служит для закрепления на принтере.

Для изготовления данного электрода-инструмента была разработана специальная конструкция 3D-принтера с дополнительной поворотной горизонтальной осью [6-9] и тремя позициями для установки 2-х экструдеров (один с установленным ABS-пластиком, второй с токопроводящим) и специальной насадки для нанесения медного гальванического покрытия. Применение данного 3D-принтера и разработанного программного обеспечения позволило осуществить аддитивное формообразование комбинированного электрода-инструмента (рис. 7).

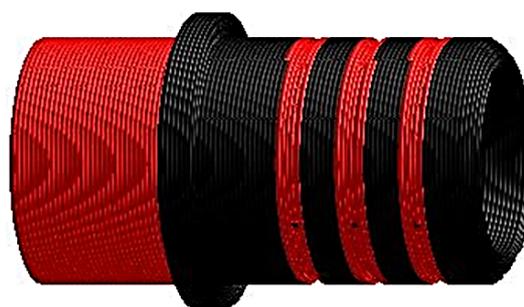


Рис. 7. Модель комбинированного ЭИ, получаемого аддитивным формообразованием

Выводы

Предложенный авторами подход к проектированию комбинированных ЭИ, в том числе и сложной формы, позволяет существенно снизить

стоимость используемых для его изготовления материалов и реализовать в последующем процесс его изготовления аддитивными методами без использования широкой номенклатуры дорогостоящего оборудования, что позволит также снизить себестоимость его изготовления.

Литература

1. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; под общ. ред. В.А. Волосатова. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1988. 719 с.
2. Григорьев С.Н., Смоленцев Е.В., Волоскова М.А. Технология обработки концентрированными потоками энергии: учебник для студентов технических вузов. Ст. Оскол: ТНТ, 2009. 280 с.
3. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки: монография. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
4. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Ч. I. Обработка материалов с применением инструмента: учеб. пособие / В.П. Смоленцев, А.И. Болдырев, Е.В. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, И.Т. Коптев. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государ-

ственный технический университет», 2008. 248 с.

5. Орлов А.А. Повышение производительности и качества изготовления лопаток компрессора ГТД за счет совершенствования технологии круговой электрохимической обработки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Рыбинск, 2014. 159 с.

6. Проектирование технологического оборудования для аддитивного формообразования с гибридной компоновкой / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олещицкий, Ю.Э. Симонова // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4. С. 111-118.

7. Динамическое управление процессом аддитивного формообразования с применением 5-координатного технологического оборудования / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, М.С. Разумов, И.В. Ванин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 1. С. 9-20.

8. Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олещицкий, М.С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 6. С. 34-44.

9. Куц В.В., Гречухин А.Н., Разумов М.С. Пути снижения погрешности аддитивных методов формообразования // Вестник МГТУ Станкин. 2019. № 1(48). С. 21-25.

Поступила 20.06.2020; принята к публикации 21.08.2020

Информация об авторах

Смоленцев Евгений Владиславович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8(473)2530973, e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Куц Вадим Васильевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел.: 8(4712)222669, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Разумов Михаил Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: mika_1984_@mail.ru

Крохин Дмитрий Евгеньевич – аспирант кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8(473)2530973, e-mail: Krochin.1993@mail.ru

DEVELOPMENT OF THE DESIGN OF THE COMBINED ELECTRODE-TOOL MANUFACTURED BY THE ADDITIVE METHOD

E.V. Smolentsev¹, V.V. Kuts², M.S. Razumov², D.E. Krokhin¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract: the article deals with the issues of electrochemical metal processing technology based on the use of the phenomenon of anodic dissolution. One of the factors limiting the area of rational use of electrochemical processing is the comparative complexity of manufacturing an electrode-tool. This is largely due to the fact that the design of electrodes-tools for electrochemical processing of metals must ensure a constant uniform supply of working conductive liquid to the areas where the processing will take place. Manufacturing complex tools for electrochemical processing requires a wide range of expensive equipment, and the cost of the process may exceed the cost of manufacturing parts. The solution to this problem is to use the capabilities of computer-aided design systems and additive technologies that allow one to implement fundamentally new elements of the design of tools, while eliminating the need for a number of resource-intensive operations performed on expensive equipment. A distinctive feature of this solution is that the body of the electrode-tool is made of plastic with dielectric properties, inside of which and on separate sections of its surface are conductive channels, layers of conductive plastic, on the outer surface of which a layer of galvanic copper coating is applied. For the production of this tool electrode, a special design of a 3D printer was developed with an additional rotating horizontal axis and three positions for installing 2 extruders (one with an installed ABS plastic, the second with a conductive one) and a special nozzle for applying copper electroplating. The use of this 3D printer and the developed software made it possible to implement additive shaping of the combined electrode of the tool. The proposed approach to the design of combined ET, including complex forms, allows one to significantly reduce the cost of

materials used for its manufacture and implement the subsequent process of its manufacture by additive methods without using a wide range of expensive equipment, which will also reduce the cost of its manufacture

Key words: electrochemical processing, additive technologies, electrode, electroplating

Acknowledgements: The Research was carried out with the financial support of the RFBR Grant in the framework of scientific project no. 19-38-50076

References

1. Amitan G.L., Baysupov I.A., Baron Yu.M. et al., ed. Volosatov V.A. "Reference book on electrochemical and electrophysical methods of processing" ("Spravochnik po elektrokhimicheskim i elektro-fizicheskim metodam obrabotki"), Leningrad, Mashinostroenie, 1988, 719 p.
2. Grigoriev S.N., Smolentsev E.V., Voloskova M.A. "Technology of processing with concentrated energy flows" ("Tekhnologiya obrabotki kontsentririrovannymi potokami energii"), Textbook for students of technical universities, St. Oskol, TNT, 2009, 280 p.
3. Smolentsev E.V. "Design of electric and combined processing methods" ("Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki"), monograph, Moscow, Mashinostroenie, 2005, 511 p.
4. Smolentsev V.P., A.I. Boldyrev, Smolentsev E.V., Smolentsev G.P., Koptev I.T. "Theory of electrical and physical-chemical processing methods. Part I: processing of materials with the use of tools" ("Teoriya elektricheskikh i fiziko-khimicheskikh metodov obrabotki. CH. I. Obrabotka materialov s primeneniem instrumenta"), textbook, Voronezh State Technical University, 2008, 248 p.
5. Orlov A.A. "Improving the productivity and quality of manufacturing of gas turbine compressor blades by improving the technology of circular electrochemical processing" ("Povyshenie proizvoditel'nosti i kachestva izgotovleniya lopatok kompressora GTD za schet sovershenstvovaniya tekhnologii krugovoy elektro-khimicheskoy obrabotki"), Cand. of Tech. Sciences diss., Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyev, 05.02.08, Rybinsk, 2014, 159 p.
6. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitskiy A.V., Simonova Yu.E. "Design of technological equipment for additive forming with hybrid layout", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 111-118.
7. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S., Vanin I.V. "Dynamic control of the additive forming process with the use of 5-coordinate technological equipment", *News of South-West State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 9-20.
8. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitskiy A.V., Razumov M.S. "Expanding the technological capabilities of additive forming methods with the use of mechanisms of parallel-sequential structure", *News of South-West State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 34-44
9. Kuts V.V., Grechukhin A.N., Razumov M.S. "Ways to reduce the error of additive methods of forming", *Bulletin of MSTU Stankin (Vestnik MGTU Stankin)*, 2019, no. 1 (48), pp. 21-25.

Submitted 20.06.2020; revised 21.08.2020

Information about the authors

Eugeny V. Smolentsev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)2530973, email: smolentsev.rabota@gmail.com

Vadim V. Kutz, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor, South Ural State University (94, 50 let Oktyabrya str., Kursk 305000, Russia), tel.: +7 (4712) 222669, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Mikhail S. Razumov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, (94, 50 let Oktyabrya str., Kursk 305000, Russia), tel.: +7 (4712) 222669, e-mail: mika_1984@mail.ru

Dmitriy E. Krokhin, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)2530973, e-mail: Krochin.1993@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК КАНАЛА ВОЗДУХОЗАБОРНИКА САМОЛЕТА

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 необходимость разработки осесимметричных оболочек для канала воздухозаборника самолета, выявленная в процессе акустических испытаний. Возникающие в полете самолета скачки импеданса отрицательно влияют на эффект шумоглушения. С целью устранения этого эффекта разработана технология изготовления осесимметричной тонколистовой оболочки, не имеющей стыков и зон в разрыве перфорации. Обнаружено, что существующее оборудование не обеспечивает процесс формообразования тонколистовых оболочек требуемого качества вследствие возникновения отпечатков от секторов. Определена цель проводимых исследований. Разработана конструкция устройства, позволяющая с помощью эластичной вставки получать заданную геометрию детали. Рассмотрены форма эластичной вставки и материалы, применяемые для ее изготовления. Представлен процесс формообразования оболочки. Изготовление оболочки необходимо осуществлять на гидравлическом прессе. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния оболочки, позволяющий получить параметры процесса формообразования. Показаны зависимости по определению тангенциальных, радиальных и меридиональных деформаций. Рассмотрены напряжения, возникающие в зоне формообразования, позволившие считать напряженно-деформированное состояние оболочки плоским. Определена величина удельного давления в зоне эластичной вставки. Разработана методика технологического процесса изготовления осесимметричной оболочки

Ключевые слова: устройство, формообразование, осесимметричная оболочка, эластичная вставка, деформации, напряжения

Введение

Канал воздухозаборника самолета обеспечивает установку двигателя и решает вопросы по снижению его шума.

При изготовлении канала воздухозаборника из комбинированных сотовых панелей, когда несущие слои изготавливаются из металлических алюминиевых сплавов, а сотовый наполнитель из стеклопластиковых композиционных материалов, вопросы шумоглушения решаются применением двухслойных сотовых конструкций. Особый интерес представляют металлические несущие слои осесимметричной формы (рис. 1). Их изготовление осуществляется из отдельных обшивок на обтяжных прессах с последующим соединением в сборочном приспособлении методом клепки с получением осесимметричной оболочки [1, 2, 3, 4]. Как правило, в оболочке в зависимости от геометрической формы содержатся четыре-шесть обшивок. Таким образом, обеспечиваются прочностные характеристики оболочки.

Однако следует отметить, что для решения вопросов по шумоглушению две оболочки имеют перфорацию, которая отсутствует в зоне стыка обшивок.

Проведенные акустические испытания показали, что в зоне стыка обшивок по длине ка-

нала возникают скачки колебаний акустического сопротивления – импеданс, влияющие на акустическую эффективность канала воздухозаборника самолета.

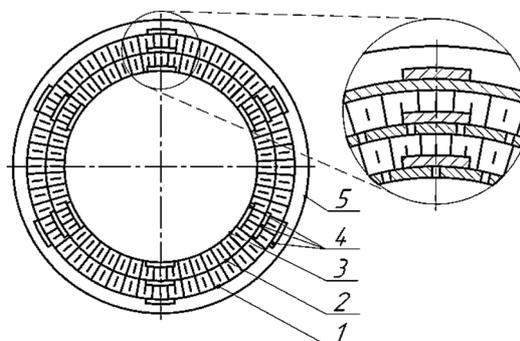


Рис. 1. Сечение канала воздухозаборника: 1 – наружная осесимметричная оболочка из сплошных обшивок; 2 – средняя осесимметричная оболочка из перфорированных обшивок; 3 – внутренняя осесимметричная оболочка из перфорированных обшивок; 4 – накладка; 5 – обшивка

Постановка задачи

Задачу возникающих скачков импеданса можно решить разработкой осесимметричной оболочки, не имеющей стыков.

Цель работы – исследование процесса формообразования осесимметричных оболочек, разработка методики процесса формообразования оболочек.

Устройство для формообразования осесимметричных оболочек

Для изготовления осесимметричных оболочек наибольшее распространение получили станки ПКД [4]. Процесс формообразования на станке осуществляется пуансоном, состоящим из отдельных секторов. При данном методе формообразования оболочки в зоне зазоров между секторами на заготовке возникают отпечатки, которые недопустимы для тонколистовых деталей.

Для изготовления осесимметричных оболочек, не имеющих отпечатков на поверхности заготовки, разработано устройство (рис. 2) [5], обеспечивающее процесс формообразования из заготовки цилиндрической формы радиусом R заданной двойной кривизны R_k .

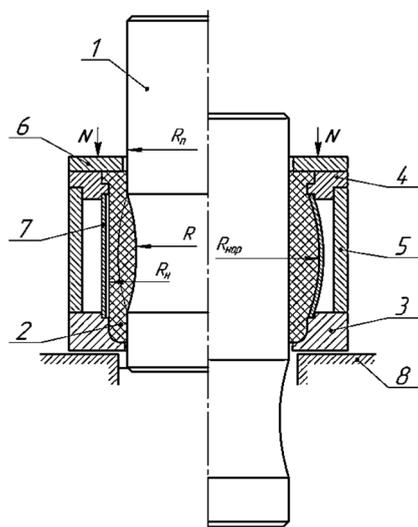


Рис. 2. Схема устройства: 1 – пуансон; 2 – эластичная вставка; 3 – опорная плита 4 – прижимная плита; 5 – колонка; 6 – крышка; 7 – заготовка; 8 – стол прессы

Конструкция устройства выполнена таким образом, что эластичная вставка, охватывающая пуансон радиусом R_n , имеет криволинейную вогнутую форму R . При перемещении пуансона в вертикальном направлении эластичная вставка осуществляет формообразование заготовки до заданных геометрических размеров.

На рис. 3 представлена эластичная вставка для формообразования оболочки.

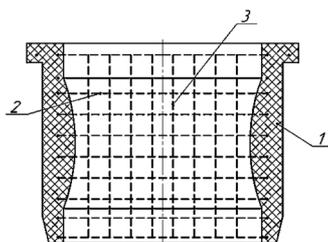


Рис. 3. Эластичная вставка: 1 – эластичная вставка; 2 – горизонтальные спиралеобразные пружины; 3 – вертикальные спиралеобразные пружины

Эластичная вставка представляет собой формирующий инструмент, выполненный из твердой резины или полиуретана. При применении твердой резины используется армирующая арматура в виде спиралеобразных пружин в вертикальном и горизонтальном исполнениях. Применение спиралеобразных пружин повышает жесткость вставки.

Между геометрическими размерами устройства и эластичной вставкой имеет место зависимость (1):

$$R_{нар}^2 - R_n^2 = R_n^2 - R^2, \quad (1)$$

где $R_{нар}$ – радиус наружный эластичной вставки;

R_n – радиус заготовки;

R_n – радиус пуансона;

R – радиус внутренней поверхности пуансона.

При формообразовании наружная эластичной вставки переходит в выпуклую форму, при этом внутренняя сторона вставки займет вертикальное положение на цилиндрической части пуансона.

Определение напряженно-деформированного состояния оболочки

Принимаем граничные условия:

1. Стороны цилиндрической заготовки не закреплены.

2. Нагрузка, прикладываемая со стороны эластичного пуансона, равномерно-распределенная.

3. Напряженно-деформированное состояние оболочки – двухосное.

4. Силы внешнего трения между эластичной вставкой и пуансоном с заготовкой не учитываются.

В процессе формообразования оболочки возникают тангенциальные, меридиональные и радиальные деформации (рис. 4) [4].

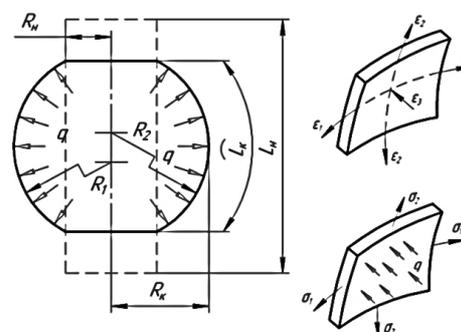


Рис. 4. Схема напряженно-деформированного состояния при формообразовании оболочки из цилиндрической заготовки

Тангенциальная деформация ε_1 определяется (2):

$$\varepsilon_1 = (R_k - R_n) / R_n, \quad (2)$$

где R_k – радиус заготовки после формообразования.

Тангенциальная деформация ε_1 является определяющей при расчете технологии изготовления оболочек. Ее величина, как правило, сравнивается с величиной относительного удлинения материала заготовки δ .

Меридиональная деформация ε_2 определяется (3):

$$\varepsilon_2 = (L_k - L_n) / L_n, \quad (3)$$

где L_n – длина заготовки до формообразования;

L_k – длина заготовки после формообразования.

Учитывая, что концы заготовки не закреплены, можно считать, что деформация в меридиональном направлении является равномерной.

Радиальная деформация ε_3 определяется (4):

$$\varepsilon_3 = (s_i / s_0) - 1, \quad (4)$$

где s_0 – толщина заготовки;

s_i – толщина заготовки после формообразования, вычисляется по формуле (5):

$$s_i = s_0 \cdot (R_n \cdot L_n / R_k \cdot L_k). \quad (5)$$

Для определения меридиональных σ_2 и тангенциальных напряжений σ_1 приведено уравнение Лапласа (6):

$$\sigma_1 / R_1 + \sigma_2 / R_2 = q / s_i, \quad (6)$$

где R_1 – радиус поперечной кривизны;

R_2 – радиус продольной кривизны.

Значение напряжения определяется (7):

$$\sigma_1 = \sigma_s + \Pi \cdot \varepsilon_1, \quad (7)$$

где Π – модуль упрочнения.

Приняв $R_2 = \infty$, величина q составляет (8):

$$q = (\sigma_s / R_1) \cdot s_i. \quad (8)$$

Значение меридиональных напряжений σ_2 определяется по зависимости (6).

Полученные зависимости позволяют разработать методику технологического процесса формообразования осесимметричной оболочки.

Методика разработки технологического процесса формообразования осесимметричной оболочки

1. Проведение механических испытаний образцов сплошных и перфорированных с записью диаграмм σ - ε и определением значений предела текучести σ_s , модуля упрочнения Π и относительного удлинения α .

2. Изготовление цилиндрической оболочки из Д16Т: радиус оболочки $R_n = 500$ мм; высота оболочки $L_n = 1000$ мм; толщина материала

заготовки $s_0 = 1$ мм; максимальная деформация заготовки $\varepsilon_1 = 10\%$; после формообразования радиус оболочки $R_k = 550$ мм.

3. Определение геометрических параметров пуансона: радиус пуансона $R_n = 400$ мм; определение радиуса вогнутой образующей пуансона по зависимости (9):

$$R = \sqrt{R_n^2 + R_n^2 - R_k^2}. \quad (9)$$

4. С учетом геометрических размеров заготовки, пуансона и устройства для формообразования оболочки определяются размеры эластичной вставки.

5. Выбор геометрических размеров эластичной вставки для проектирования пресс-формы с учетом радиуса вогнутой образующей поверхности пуансона.

6. Определение характера деформаций и напряжений, возникающих в процессе формообразования оболочки, по вышеприведенным зависимостям.

Параметры процесса формообразования приведены в таблице.

Параметры процесса формообразования

s_0	L_n	R_n	R_1	R_2	R_n	s_i	R_k	σ_1	σ_2	q	σ_s	Π	ε_1	α
мм								МПа				%	-	
1	1000	500	530	1200	400	0,9	550	210	120	0,4	180	300	10	16

Приведенная методика позволяет осуществлять разработку технологического процесса формообразования осесимметричной оболочки из сплошной и перфорированной заготовок.

Выводы

1. Разработана конструкция устройства для формообразования осесимметричных оболочек, позволяющая получать детали без стыков, обеспечивая повышение акустических характеристик канала воздухозаборника самолета.

2. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния процесса формообразования осесимметричной оболочки, позволяющий определить параметры устройства для формообразования и разрабатывать технологию изготовления осесимметричной оболочки.

3. Разработана методика технологии изготовления осесимметричной оболочки, позволяющая осуществлять расчет формирующего инструмента и определять параметры процесса формообразования.

Литература

1. Максименков В.И., Молод М.В., Федосеев В.И. Направления повышения эффективности двухслойных сотовых конструкций для канала воздухозаборника самолета // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 6. С. 86-89.

2. Максименков В.И., Молод М.В., Федосеев В.И. Метод повышения качества обшивки самолета // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 5. С. 138-142.

3. Максименков В.И., Молод М.В., Федосеев В.И. Формообразующие технологии для изготовления кожухов шумоглушения турбореактивного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 3. С. 167-174.

4. Горбунов М.Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 351 с.

5. А.с. 1218545 СССР, МПК В21D 22/10. Инструмент для листовой штамповки / В.С. Гусев, В.И. Максименков (СССР). Опубл. 1984.

Поступила 24.05.2020; принята к публикации 21.08.2020

Информация об авторах

Максименков Владимир Иванович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

Молод Марина Владиславовна - д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), 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

IMPROVING THE QUALITY OF THE AIRCRAFT AIR INTAKE AXISYMMETRIC CHANNEL SHELLS

V.I. Maksimenkov¹, M.V. Molod¹, V.I. Fedoseev²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Branch of "Corporation" Irkut", Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the necessity to develop axisymmetric shells for the air intake channel of the aircraft, identified in the course of acoustic tests. It was found that the existing equipment does not provide the process of forming thin-sheet shells to the required quality due to the appearance of prints from sectors. The purpose of the research is defined. A device design was developed that allows one to achieve the specified geometry of the detail using elastic insert. The form of an elastic insert and the materials used for its manufacture are considered. The process of shell formation is considered. The stress-strain state of the shell is analyzed. Dependencies for calculating tangential, radial, and meridional deformations are given. The stresses arising in the forming zone are considered, which allowed us to consider the stress-strain state of the shell as flat. The value of the specific pressure in the elastic insert zone is determined. The method of manufacturing axisymmetric shell is developed

Key words: device, shaping, axisymmetric shell, elastic insert, deformations, stresses

References

1. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Fedoseev V.I. "Directions for improving the efficiency of two-layer honeycomb structures for the air intake channel of an aircraft", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol.13, no. 6, pp. 86-89

2. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Fedoseev V.I. "The method for improving the quality of aircraft skin", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 5, pp. 138-142.

3. Maksimenkov V.I., Molod M.V., Fedoseev V.I. "Forming technologies for the manufacture of turbojet engine noise reduction casings", *Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technology and Mechanical Engineering (Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie)*, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 167-174

4. Gorbunov M.N. "Technology of procurement and stamping works in the production of aircraft" ("Tekhnologiya zagotovitelno-shtampovochnykh rabot v proizvodstve letatelnykh apparatov"), Moscow, Mashinostroenie, 1970, 351 p.

5. Gusev V.S., Maksimenkov V.I. "Tool for sheet metal forming" ("Instrument dlya listovoy shtampovki"), certificate of authorship no. 1218545 USSR, МПК В21D 22/10, publ. 1984

Submitted 24.05.2020; revised 21.08.2020

Information about the authors

Vladimir I. Maksimenkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail:maksimenkov.v.i@mail.ru

Marina V. Molod, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, 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

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ШТАМПОВКИ ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

А.Ю. Боташев, Р.А. Байрамуков, Н.У. Бисилов, Э.Х. Джуманазаров, Р.С. Малсугенов

Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Россия

Аннотация: полые тонкостенные детали широко используются в конструкциях машин и аппаратов. Для снижения расхода материала такие детали целесообразно производить из трубных заготовок. В существующих методах производства полых изделий деформирование трубной заготовки производится при температуре окружающей среды, что существенно ограничивает степень раздачи трубной заготовки. Авторами разработано новое штамповочное оборудование для производства тонкостенных изделий из трубной заготовки, которое производит процесс штамповки с нагревом заготовки. При этом из-за повышения пластичности заготовки достигается значительное увеличение степени ее раздачи. Нагрев и деформирование трубной заготовки осуществляется под действием горячего газа, образующегося при сгорании горючей газовой смеси в полости заготовки [1]. Для увеличения давления и температуры газа, действующего на внутреннюю поверхность заготовки, горючая газовая смесь предварительно сжимается непосредственно в полости трубной заготовки. Проведено исследование термодинамических процессов разработанного устройства. При этом установлено, что давление газа на поверхности заготовки составляет 50...65 МПа, а его температура достигает 2600 К. Это обеспечивает существенное расширение технологических возможностей данного устройства. Проведено исследование деформирования трубной заготовки в процессе штамповки, при этом получены зависимости для определения напряжений, действующих в заготовке, а также потребной величины давления топливной смеси, обеспечивающей осуществление процесса штамповки

Ключевые слова: штамповка деталей из трубной заготовки, газовая штамповка

Введение

В конструкциях машин, аппаратов и устройств широко используются тонкостенные полые детали. Такие детали целесообразно производить из трубных заготовок, так как при этом снижается себестоимость производства за счет сокращения расхода материала и уменьшения количества операций технологического процесса. Известны методы изготовления полых деталей из трубной заготовки, путем раздачи ее воздействием твердого или эластичного инструмента [2-9]. В большинстве из них деформирование трубной заготовки производится в холодном ее состоянии, что ограничивает технологические возможности этих методов из-за невысокой пластичности заготовок. Нагрев трубной заготовки до интервала температур теплой или горячей обработки [10], повышая ее пластичность, обеспечивает более благоприятные условия для ее формоизменения. Известны также технологии изготовления полых деталей из трубных заготовок с нагревом электрическим током, но при этом существенно усложняется и удорожается используемая технологическая оснастка, что обуславливает повышение себестоимости производимых деталей. В этой

связи разработка новых видов штамповочного оборудования для производства полых изделий из трубной заготовки является актуальной задачей [11].

Целью данной работы является разработка нового оборудования для штамповки полых изделий из трубной заготовки, осуществляющего процесс штамповки в интервале температур теплой или горячей обработки. Для достижения этой цели поставлены следующие основные задачи: разработка конструкции устройства газовой штамповки полых изделий из трубной заготовки и установление зависимостей для расчета его энергосиловых характеристик.

Разработка устройства газовой штамповки полых изделий из трубной заготовки

Нагрев трубной заготовки до интервала температур теплой или горячей обработки целесообразно производить воздействием на ее внутреннюю поверхность высокотемпературного газа, имеющего высокое давление. Для реализации этой идеи разработано новое штамповочное устройство [12], показанное на рис. 1.

Силовой каркас штампованного устройства образован корпусом 1 и плитой 2, соединенных между собой стяжными колоннами 3 и гайками 4, 5. В корпусе 1 соосно расположены

камера сгорания 6 и цилиндр 7, в котором установлен поршень 8 с эластичным диском 9 [13]. На корпусе 1 установлены клапаны 10, 11, 13 и свеча зажигания 12, а также переходник 14 с каналами 15, расположенный над цилиндром 7. На торце переходника 14 установлена шайба 16, служащая в качестве обратного клапана. Фиксация положения штампующей трубной заготовки производится при помощи винта 18, расположенного в плите 2 соосно цилиндру 7, и крышки 19, в которой выполнены полость 20 и соединенный с ней канал 21. Крышка 19 снабжена свечей зажигания 22 и клапаном 23. Штампующая трубная заготовка 29 располагается в полости матрицы, образованной полуматрицами 26, 27. Матрица с заготовкой устанавливается на торец корпуса 1, после чего винт 18, вращаясь, перемещается вниз до соприкосновения крышки 19 с торцом заготовки 29. При этом благодаря наличию уплотнений 25 и 28 обеспечивается герметичность внутренней полости 30 заготовки 29.

Для осуществления процесса штамповки через клапан 13 производится наполнение цилиндра 7 и полости 30 горючим газом, например пропан-бутаном, и сжатым воздухом, в результате чего в них образуется горючая смесь. Затем аналогично производится наполнение камеры сгорания 6 горючей смесью, используя при этом клапан 10, причем давление смеси устанавливается равным давлению горючей смеси в цилиндре 7. После этого горючая смесь в камере сгорания 6 поджигается свечей 12. Горение смеси вызывает интенсивный рост давления в камере сгорания 6 [14]. При этом поршень 8 ускоренно движется вверх и вытесняет горючую смесь из цилиндра 7 через каналы 15 в полость 30. Благодаря наличию эластичного диска 9 обеспечивается безударная остановка поршня 8 в конце его хода. Сжатая горючая смесь в полости 30 поджигается свечей 22. Горение этой смеси обуславливает интенсивный рост давления и температуры в полости 30. Это обеспечивает нагрев и деформирование заготовки 29. Следует отметить, что деформирование заготовки происходит не только под действием внутреннего давления, но и под действием давления переходника 15 на торец заготовки, что существенно снижает ее утонение в процессе деформирования.

После заполнения заготовкой полости матрицы газ из цилиндра 7 и полости 30 выпускается через клапаны 11 и 23. Затем отштампованное изделие извлекается из штамповочного устройства.

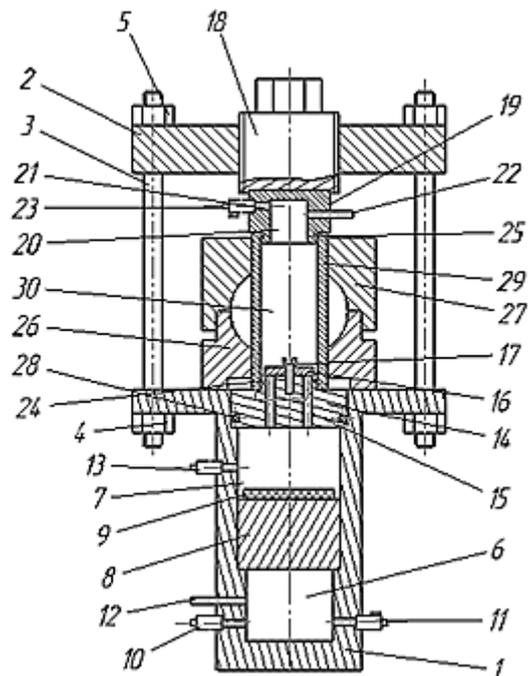


Рис. 1. Схема устройства для штамповки полых деталей из трубной заготовки

Исследование процесса нагрева трубной заготовки в данном устройстве проведено в работе [15]. При этом установлено, что для нагрева до температур горячей обработки трубных заготовок толщиной до 1,5 мм требуется давление топливной смеси не более 2 МПа, что вполне реализуемо на практике.

Для установления зависимостей для расчета энергосиловых характеристик разработанного устройства рассмотрим происходящие в нем термодинамические процессы.

Исследование термодинамических процессов устройства

Рабочий процесс данного устройства состоит из следующих термодинамических процессов: сгорание топливной смеси в камере сгорания, сжатие топливной смеси в рабочем цилиндре и в полости заготовки, сгорание сжатой топливной смеси в полости заготовки, охлаждение и расширение продуктов сгорания в процессе нагревания и деформирования заготовки.

Без большой погрешности можно считать, что процесс сгорания топливной смеси в камере сгорания происходит при постоянном объеме. Поэтому максимальное давление продуктов сгорания

$$P_{\max} = \lambda P_c, \quad (1)$$

где P_c – давления топливной смеси, Па; λ – степень повышения давления при сгорании в

постоянном объеме, для газоздушных топливных смесей стехиометрического состава $\lambda = 7 \dots 8$ [13,16].

Процесс сжатия можно считать адиабатическим вследствие его кратковременности [17, 18]. Тогда максимальное давление топливной смеси в полости заготовки определяется следующими зависимостями:

$$P_3^* = P_c \left(\frac{V_{ц} + V_3}{V_3} \right)^{k_c} = P_c (v_{цз} + 1)^{k_c} = P_c P_c, \quad (2)$$

$$v_{цз} = V_{ц} / V_3, \quad (3)$$

$$P_c = P_3^* / P_c = (v_{цз} + 1)^{k_c}, \quad (4)$$

где P_3^* – максимальное давление топливной смеси в полости заготовки, Па;

$V_{ц}$ – объем рабочего цилиндра, м³;

V_3 – объем полости трубной заготовки, м³;

k_c – показатель адиабаты топливной смеси;

$v_{цз}$ – соотношение объемов рабочего цилиндра и полости заготовки;

P_c – степень повышения давления топливной смеси в полости заготовки.

Объем рабочего цилиндра в 2...2,5 раз больше объема полости заготовки, а объем камеры сгорания 2,5...5 раз превышает объем рабочего цилиндра. При таких соотношениях объемов $P_c = 4,6 \dots 5,8$, то есть в результате сжатия давление топливной смеси в полости заготовки увеличивается в 4,6...5,8 раз.

Увеличение давления топливной смеси сопровождается повышением ее температуры:

$$T_3^* = P_c^{k_c} T_c, \quad (5)$$

где T_c – абсолютная температура топливной смеси в начале процесса сжатия, К; T_3^* – максимальная абсолютная температура топливной смеси в полости заготовки, К.

Начальная температура топливной смеси близка к абсолютной температуре окружающей среды, учитывая это, примем $T_c = 300$ К. Тогда, считая $k_c = 1,4$ и учитывая вышеприведенные значения P_c , по зависимости (5) получим $T_3^* = 450 \dots 480$ К, то есть абсолютная температура топливной смеси в полости заготовки перед началом ее зажигания составляет 450... 480 К.

Процесс сгорания топливной смеси в полости заготовки происходит практически при постоянном объеме, так как в этот период деформация заготовки мала. Тогда максимальное давление продуктов сгорания в полости заготовки

$$P_{3 \max} = \lambda_3 P_3^* = \lambda_3 P_c P_c, \quad (6)$$

где $P_{3 \max}$ – давление в полости заготовки в конце процесса сгорания топливной смеси; λ_3 –

степень повышения давления в полости заготовки в результате сгорания топливной смеси [19].

При этом величина степени повышения давления определяется формулой:

$$\lambda_3 = T_{3 \max} / T_3^*, \quad (7)$$

где $T_{3 \max}$ – максимальная абсолютная температура продуктов сгорания в полости заготовки.

Величина $T_{3 \max}$ определяется из уравнения теплового баланса процесса сгорания [20]. Проведенные расчеты по этому уравнению показали, что при $T_3^* = 450 \dots 480$ К $T_{3 \max} = 2580 \dots 2600$ К. Тогда по зависимости (7) получим $\lambda_3 = 5,4 \dots 5,7$.

Максимальная величина давления топливной смеси P_c может достигать 2 МПа. Следовательно, давление продуктов сгорания на поверхности обрабатываемой трубной заготовки согласно зависимости (6) достигает 50...65 МПа, что в 2...3 раза превышает давление, развиваемое в известных устройствах газовой штамповки. Это существенно расширяет технологические возможности данного устройства, в частности позволяет штамповать из трубных заготовок детали значительно большей толщины, а также производить за одну технологическую операцию детали сложной формы, что снижает себестоимость их производства.

Нагрев заготовки сопровождается ее деформацией, при этом интенсивность деформации существенно увеличивается с ростом температуры заготовки. Учитывая это, будем считать, что заготовка сначала нагревается, что сопровождается пропорциональным снижением давления продуктов сгорания, а затем происходит ее деформация, при этом продукты сгорания адиабатически расширяются. Исходя из этого, давление в заключительной стадии штамповки определяется выражением:

$$P_{3к} = \beta P_{3 \max} \frac{T_{3н}}{T_{3 \max}} \left(\frac{V_3}{V_d} \right)^k = \beta \lambda_3 P_c P_c \frac{T_{3н}}{T_{3 \max}} \left(\frac{V_3}{V_d} \right)^k, \quad (8)$$

где $T_{3н}$ – абсолютная температура продуктов сгорания в конце процесса нагрева заготовки, V_d – объем полости заготовки в конце процесса штамповки, который равен объёму штампуемого изделия, м³;

β – коэффициент, учитывающий долю энергии, идущей на нагрев заготовки, в общем энергобалансе теплообмена. В зависимости от соотношения длины и диаметра заготовки $\beta = 0,4 \dots 0,6$.

Исследование рабочего процесса устройства формовки

Схема деформирования трубной заготовки представлена на рис. 2. На внутреннюю поверхность заготовки действует давление газа P . Под действием этого давления происходит раздача заготовки. Так как толщина заготовки во много раз меньше радиуса ее внутренней поверхности R_3 , то для определения напряжений, возникающих в заготовке при ее раздаче, может быть использовано уравнение Лапласа для тонкой оболочки.

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = \frac{P}{\delta_3} \quad (9)$$

где σ_m , σ_θ – меридиальные и широтные напряжения, Па;

ρ_m , ρ_θ – меридиальные и широтные радиусы кривизны, м;

P – давление, Па;

δ_3 – толщина заготовки, м.

В этом уравнении два неизвестных: σ_m и σ_θ [21]. Для их определения требуется ещё одно уравнение. Этим уравнением может быть уравнение равновесия одной части деформирующейся заготовки, если ее рассечь посередине перпендикулярно ее оси. Запишем это уравнение как проекцию на горизонтальную ось всех сил, действующих на эту часть заготовки.

$$2\pi R_3 \delta_3 \sigma_m - \pi(\rho_\theta^2 - R_3^2)P = 0, \quad (10)$$

где R_3 – радиус внутренней поверхности заготовки. Отсюда получим

$$\sigma_m = P \frac{(\rho_\theta^2 - R_3^2)}{2\rho_\theta \delta_3}. \quad (11)$$

Подставляя это в уравнение (9), будем иметь

$$P \frac{\rho_\theta^2 - R_3^2}{2\rho_\theta \delta_3 \rho_m} + \frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta} = \frac{P}{\delta_3}. \quad (12)$$

Отсюда получим зависимость для определения σ_θ

$$\sigma_\theta = P \rho_\theta \left(\frac{1}{\delta_3} - \frac{\rho_\theta^2 - R_3^2}{2\rho_\theta \delta_3 \rho_m} \right). \quad (13)$$

Напряжения σ_m и σ_θ являются главными напряжениями. Они по величине значительно превышают давление, действующее на внутреннюю поверхность заготовки. Поэтому в данном случае можно считать, что заготовка находится в плоском напряженном состоянии. Тогда условия пластичности имеет следующий вид [8, 21].

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_s, \quad (14)$$

где σ_1 , σ_3 – главные напряжения, Па;

σ_s – предел текучести материала заготовки, Па.

Напряжения σ_m и σ_θ являются растягивающими напряжениями, причем $\sigma_\theta > \sigma_m$. Поэтому в данном случае $\sigma_1 = \sigma_\theta$; $\sigma_3 = \sigma_m$; $\sigma_3 = P \approx 0$. Тогда условие текучести (14) примет следующий вид

$$\sigma_\theta = \sigma_s. \quad (15)$$

Отсюда, учитывая зависимость (13), можно записать

$$\sigma_s = P \rho_\theta \left(\frac{1}{\delta_3} - \frac{\rho_\theta^2 - R_3^2}{2R_3 \delta_3 \rho_m} \right). \quad (16)$$

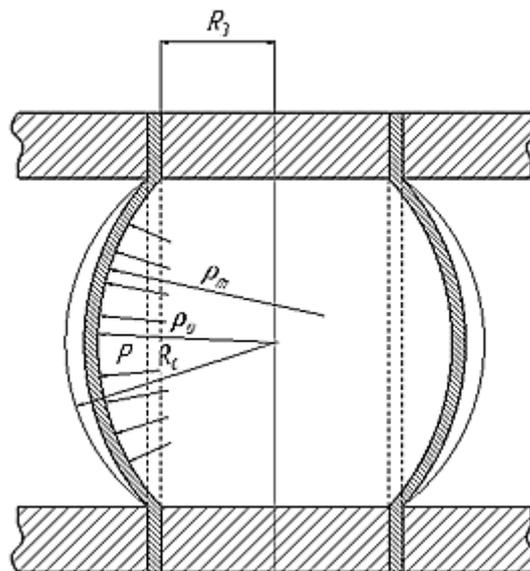


Рис. 2. Схема нагружения деформируемой заготовки

Из уравнения (16) определяется необходимая величина давления газа для осуществления процесса штамповки

$$P = \frac{\delta_3 \sigma_s}{\rho_\theta} \left(1 - \frac{\rho_\theta^2 - R_3^2}{2\rho_\theta \rho_m} \right)^{-1}. \quad (17)$$

В процессе штамповки усилие деформирования, как правило, увеличивается. Поэтому в данном случае максимальное давление газа требуется в конечной стадии процесса штамповки, то есть

$$P = P_{3к}. \quad (18)$$

Тогда из зависимостей (8), (17), (18) будем иметь

$$\frac{\delta_3 \sigma_s}{\rho_\theta} \left(1 - \frac{\rho_\theta^2 - R_3^2}{2\rho_\theta \rho_m} \right)^{-1} = \beta \lambda_3 \Pi_c P_c \frac{T_{pH}}{T_{pmax}} \left(\frac{V_p}{V_{pK}} \right)^k. \quad (19)$$

Из уравнения (19) получим:

$$P_c = \frac{\sigma_s \delta_3}{\beta \rho_\theta \lambda_3 \Pi_c} \frac{T_{3max}}{T_{3H}} \left(\frac{V_d}{V_3} \right)^k \left(1 - \frac{\rho_\theta^2 - R_3^2}{2\rho_\theta \rho_m} \right)^{-1}. \quad (20)$$

Эта формула определяет величину давления горючей газовой смеси, достаточную для осуществления процесса штамповки.

Максимальное значение давления газа требуется для штамповки сферообразного изделия. Определим давление газа для этого случая. При штамповке сферообразного изделия в

конечной стадии процесса (на рис. 2 это положение заготовки показано тонкой линией)

$$\rho_m = \rho_\theta = R_c. \quad (21)$$

Тогда зависимость (20) примет следующий вид:

$$P_c = \frac{\delta_3 \sigma_s}{\beta \lambda_3 R_c P_c} \frac{T_{3\max}}{T_{3н}} \left(\frac{V_d}{V_3}\right)^k \frac{2}{1 + \left(\frac{R_3}{R_c}\right)^2} \quad (22)$$

Оценим давление топливной смеси для случая штамповки из трубной заготовки радиусом $R_3 = 75$ мм и толщиной $\delta_3 = 2$ мм сферической детали радиусом $R_c = 150$ мм из стали 3. Нижняя граница интервала температур горячей обработки стали составляет $850 \dots 900$ °C [22]. Для нагрева заготовки до такой температуры температура продуктов сгорания в конце процесса нагрева заготовки должна быть $1200 \dots 1300$ К, поэтому для данного случая $T_{3\max}/T_{3н} \approx 2$. При температуре 900 °C предел текучести стали 3 составляет около 90 МПа, поэтому примем $\sigma_s = 90$ МПа. Соотношение объемов детали и заготовки примем равным 2. Тогда, принимая $P_c = 5$, $\lambda_3 = 5,5$, $\beta = 0,4$, $k = 1,28$, из зависимости (21) получим $P_c \approx 0,9$ МПа. Исходя из этого, можно заключить, давление топливной смеси, необходимое для осуществления процесса штамповки, имеет сравнительно небольшую величину. Это снижает расход топливной смеси и позволяет эффективно использовать данное устройство в мелкосерийном и опытно-производственных для изготовления тонкостенных полых деталей.

Следует отметить, что согласно зависимости (22) с уменьшением диаметра величина P_c увеличивается. В частности, для рассмотренного выше случая для штамповки детали радиусом $R_3 = 75$ мм из заготовки $R_c = 38$ мм давление топливной смеси составляет 1,8 МПа. В этой связи данное устройство целесообразно использовать для штамповки деталей диаметром более 120...150 мм.

Заключение

1. Разработано новое оборудование для штамповки тонкостенных полых деталей из трубной заготовки, осуществляющее процесс штамповки с нагревом заготовки, используя энергию горючих газовых смесей.

2. Получена зависимость для определения потребной величины давления горючей смеси для осуществления деформирования трубной заготовки.

3. В разработанном устройстве давление газа на поверхности штампуемой заготовки до-

стигает 50...65 МПа, что значительно превышает давление, развиваемое в известных устройствах газовой штамповки. Это открывает перспективы для использования данного устройства в промышленном производстве, особенно в мелкосерийных производствах.

Литература

1. Боташев, А.Ю., Байрамуков Р.А. Разработка и исследование устройства для газовой листовой штамповки с поршневым мультипликатором давления // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 2. С. 132-144.
2. Ильин Л.Н., Семенов Е.И. Технология листовой штамповки. М.: Дрофа, 2009. 479 с.
3. Пат. 2209701 Российская Федерация, RU 2209701 МПК В21D41/02. Способ раздачи тонкостенных трубчатых заготовок / Никифоров Ю.Б., Костоглот Л.А. Оpubл. 10.08.2003.
4. Пат. 2152285 Российская Федерация, RU 2152285 МПК В21D41/02. Способ получения деталей из трубных заготовок / Марьин Б.Н., Кузьмин В.Ф., Шпорт В.И., Иванов Ю.Л., Муравьев В.И. Оpubл. 10.07.2000.
5. Пат. 2239509 Российская Федерация, RU 2239509 МПК В21D41/02. Способ изготовления полых деталей из трубной заготовки / Краев В.Н., Бабкин Е.А., Малыгин А.Н., Оpubл. 10.11.2004.
6. Штамповка конических и сферических деталей из трубных заготовок / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, Е.И. Третьякова, А.Е. Сосенушкин // Кузнечно-штамповочное производство. 2010. № 11. С. 18-21.
7. Каменецкий Б.И., Резер А.И., Богатов А.А. Гидравлическая формовка сложных полых изделий // Кузнечно-штамповочное производство. 2006. № 9. С. 26-32.
8. Лукьянов В.П., Маткаева И.И., Бойко В.А. Пластическое деформирование при обработке давлением деталей трубопроводов. Волгоград: Панорама, 2012. 168 с.
9. Гидромеханическая штамповка деталей трубопроводов / В.П. Лукьянов, И.И. Маткаева, В.А. Бойко, Д.В. Доценко, В.А. Елхов. Волгоград: Панорама, 2007. 264 с.
10. Технология конструкционных материалов [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов / А.Г. Алексеев [и др.]. Электрон. текстовые данные. СПб.: Политехника, 2016. 599 с. URL: <http://www.iprbookshop.ru/59723.html>. — ЭБС «IPRbooks»
11. Пат. 2104815 Российская Федерация, RU 2104815 МПК В21D 41/02. Штамп для раздачи труб из титановых сплавов / Фролов П.В., Марьин Б.Н., Муравьев В.И., Макаров К.А., Макарова Е.А., Иванов Ю.Л.. Оpubл. 02.20.1998.
12. Пат. 186863 Российская Федерация, RU 186863 МПК В21D 26/08. Устройство для импульсной штамповки деталей из трубчатых заготовок / Боташев А.Ю., Джуманазаров Э.Х., Байрамуков Р.А., Малсугенов Р.С. Оpubл. 06.02.2019. Бюл. № 4.
13. Боташев А.Ю., Байрамуков Р.А. Разработка устройства для штамповки биметаллических изделий воздействием высокотемпературного газа // Известия Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии. 2017. № 3. С. 8-12.
14. Боташев А.Ю., Бисилев Н.У., Малсугенов Р.С. Исследование процесса нагрева заготовки при газовой листовой штамповке // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 5. С. 20-24.

15. Исследование процесса нагрева трубной заготовки в устройстве газовой формовки / А. Ю. Боташев, Р.А. Байрамуков, Р.С. Малсугенов, Э. Х. Джуманазаров // Известия Северо-Кавказской государственной академии. 2019. № 4. С. 44-51.

16. Бисилов Н.У. Исследование приемов расширения технологических возможностей высокоскоростной листовой штамповки: дис. канд. техн. наук: 05.02.09 / Н.У. Бисилов. Черкесск, 2014. 119 с.

17. Ерофеев В.Л., Семенов П.Д., Пряхин А.С. Теплотехника: учебник для вузов; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.Л. Ерофеева. М.: ИКЦ «Академкнига», 2008. 488 с.

18. Теплотехника: учебное пособие / Гдалев А.В., Козлов А.В., Сапрунов Ю.И., Майоров С.Г. Саратов: Научная книга, 2012. 286 с.

19. Малсугенов Р.С. Исследование рабочего процесса устройства для газовой формовки с дополнительной

камерой сгорания // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения: тр. Междунар. науч. конф. Липецк: ООО «Максимал информационные технологии», 2015. С. 37-42.

20. Двигатели внутреннего сгорания / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др. М.: Машиностроение, 1983. 273 с.

21. Малсугенов Р.С. Разработка технологии и оборудования для газовой формовки с противодавлением тонколистовых деталей: дис. канд. техн. наук: 05.02.09/ Р.С. Малсугенов. – Москва, 2016. – 143 с.

22. Боташев А.Ю., Джуманазаров Э.Х. Исследование импульсной формовки тонкостенных деталей из трубчатой заготовки // Известия Северо-Кавказской государственной гуманитарно-технологической академии. 2018. № 3. С. 13-18.

Поступила 22.05.2020; принята к публикации 21.08.2020

Информация об авторах

Боташев Анвар Юсуфович – д-р техн. наук, профессор, Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: botashev11@mail.ru

Байрамуков Рашид Альбертович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и переработка материалов», Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: melov.mel@mail.ru

Бисилов Назим Урусланович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и переработка материалов», Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: w9187124909@mail.ru

Джуманазаров Эзиз Ханмамедович – аспирант, Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: eziz22@mail.ru

Малсугенов Роман Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологические машины и переработка материалов», Северо-Кавказская государственная академия (369001, Россия, г. Черкесск, ул. Ставропольская, 36), e-mail: malsugenov_roma@mail.ru

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF NEW EQUIPMENT FOR STAMPING HOLLOW PRODUCTS FROM A TUBE BILLET

A.Yu. Botashev, R.A. Bayramukov, N.U. Bisilov, E.Kh. Dzhumanazarov, R.S. Malsugenov

North Caucasian State Academy, Cherkessk, Russia

Abstract: hollow thin-walled parts are widely used in the construction of machines and apparatuses. To reduce the consumption of material, it is advisable to produce such parts from tube blanks. In existing methods for the production of hollow parts, the deformation of the tube stock is carried out in its cold state. Moreover, due to the limited plasticity of the workpiece, parts of complex shape are produced in several transitions, which increases the cost of their production. We have developed new stamping equipment for the production of hollow products from a tubular billet, performing the stamping process in the temperature range of hot or warm processing, while increasing the plasticity of the workpiece provides stamping of complex shapes in one technological operation. The billet is heated to a predetermined temperature and its subsequent deformation is carried out under the influence of the combustion products of the gaseous fuel mixture. To increase the pressure and temperature of the combustion products, the fuel mixture is pre-compressed directly in the cavity of the tube billet. A study of the thermodynamic processes of the developed device. It was found that the gas pressure on the surface of the workpiece is 50 ... 65 MPa, and its temperature reaches 2600 K. This provides a significant expansion of the technological capabilities of this device. A study was made of the deformation of the pipe billet during the stamping process, while dependencies were obtained to determine the stresses acting in the billet, as well as the required pressure of the fuel mixture, ensuring the implementation of the stamping process

Key words: stamping of parts from a pipe billet, gas stamping

References

1. Botashev A.Yu., Bayramukov R.A. "Development and research of a device for gas sheet stamping with a piston pressure multiplier", *Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technology and Engineering (Vestnik Samarского университета. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye)*, 2018, vol. 2, no. 2, pp. 44-51.
2. Il'in L.N., Semenov E.I. "Stamping technology" ("Tekhnologiya listovoy shtampovki"), Moscow, Drofa, 2009, 479 p.

3. Nikiforov Yu.B., Kostoglot L.A. "Method of distribution of thin-walled tubular blanks, patent for the invention" ("Sposob razdachi tonkostennykh trubchatykh zagotovok"), patent no. 2209701 of Russian Federation, RU 2209701 IPC B21D41/02, publ. 08.10.2003.
4. Mar'in B.N., Kuz'min V.F., Shport V.I., Ivanov Yu.L., Murav'ev V.I. "Method of obtaining parts from pipe billets" ("Sposob polucheniya detaley iz trubnykh zagotovok"), patent no. 2152285 of Russian Federation, RU 2152285 IPC B21D41 / 02, patent for invention, publ. 07.10.2000.
5. Kraev V.N., Babkin E.A., Malygin A.N. "Method of manufacturing hollow parts from a tube stock" ("Sposob izgotovleniya polykh detaley iz trubnoy zagotovki"), patent no. 2239509 of Russian Federation, RU 2239509 IPC B21D41 / 02., patent for invention, publ. 11.10.2004.
6. Sosenushkin E.N., Yanovskaya E.A., Tret'yakova E.I., Sosenushkin A.E. "Stamping of conical and spherical parts from pipe billets", *Forging and Stamping (Kuznechno-shtampovnochnoe proizvodstvo)*, 2010, no. 11, pp. 18-21.
7. Kamenetskiy B.I., Rezer A.I., Bogatov A.A. "Hydraulic molding of complex hollow products", *Forging and Stamping (Kuznechno-shtampovnochnoe proizvodstvo)*, 2006, no. 9, pp. 26-32.
8. Luk'yanov V.P., Matkaeva I.I., Boyko V.A. "Plastic deformation during pressure treatment of pipeline parts" ("Plasticheskoe deformirovaniye pri obrabotke davleniem detaley truboprovodov"), Volgograd, Panorama, 2012, 168 p.
9. Luk'yanov V.P., Matkaeva I.I., Boyko V.A., Dotsenko D.V., Elkhov V.A. "Hydromechanical stamping of pipeline parts" ("Gidromekhanicheskaya shtampovka detaley truboprovodov"), Volgograd, Panorama, 2007, 264 p.
10. Alekseev A.G. et al. "Technology of construction materials" ("Tekhnologiya konstruktivnykh materialov"), St. Petersburg, Politekhnik, 2016, 599 p.
11. Frolov P.V., Mar'in B.N., Murav'ev V.I., Makarov K.A., Makarova E.A., Ivanov Yu.L. "Stamp for the distribution of pipes made of titanium alloys" ("Shtamp dlya razdachi trub iz titanovykh splavov"), patent no. 2104815 of Russian Federation, RU 2104815 IPC B21D 41/02., patent for the invention, publ. 20.02.1998.
12. Botashev A.Yu., Dzhumanazarov E.Kh., Bayramukov R.A., Malsugenov R.S. "Device for pulse stamping of parts from tubular blanks" ("Ustroystvo dlya impul'snoy shtampovki detaley iz trubchatykh zagotovok"), patent no. 186863 of Russian Federation, RU 186863 IPC B21D 26/08, patent for utility model, publ. 02.06.2019, bull. no. 4.
13. Botashev A.Yu., Bayramukov R.A. "Development of a device for stamping bimetallic products by exposure to high-temperature gas", *Bulletin of North Caucasian State Academy (Izvestiya Severo-Kavkazskoy gosudarstvennoy gumanitarno-tehnologicheskoy akademii)*, Cherkessk, 2019, no. 3, pp. 8-12.
14. Botashev A.Yu., Bisilov N.U., Malsugenov R.S. "Investigation of the process of changing the workpiece during gas sheet stamping", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroeniye)*, 2014, no. 5, pp. 20-24.
15. Botashev A.Yu., Bayramukov R.A., Malsugenov R.S., Dzhumanazarov E. Kh. "Investigation of the process of heating a tube billet in a gas molding device", *Bulletin of North Caucasian State Academy (Izvestiya Severo-Kavkazskoy gosudarstvennoy gumanitarno-tehnologicheskoy akademii)*, Cherkessk, 2019, no. 4, pp. 44-51.
16. Bisilov N.U. "Study of methods for expanding the technological capabilities of high-speed sheet stamping" ("Issledovanie priyemov rasshireniya tekhnologicheskikh vozmozhnostey vysokoskorostnoy listovoy shtampovki"), Cand. of Tech. Sciences diss., 05.02.09, Cherkessk, 2014, 119 p.
17. Erofeev V.L., Semenov P.D., Pryakhin A.S. "Heat engineering: Textbook for high schools" ("Teplotekhnika: Uchebnik dlya vuzov."), Moscow, Akademkniga, 2008, 488 p.
18. Gdalev A.V., Kozlov A.V., Saprunov Yu.I., Mayorov S.G. "Heat engineering: manual. ("Teplotekhnika: uchebnoe posobie"), Saratov, Scientific book, 2012, 286 p.
19. Malsugenov R.S. "Study of the working process for gas molding with an additional combustion chamber", *Proceedings of the International Scientific Conference: Modern Science: Actual Problems and Solutions (Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya: tr. Mezhdunar. nauch. konf.)*, Lipetsk, Maksimal informatsionnye tekhnologii, 2015, pp. 37-42.
20. Vyruvov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I. "Internal combustion engines" ("Dvigateli vnutrennego sgoraniya"), Moscow, Mashinostroeniye, 1983, 273 p.
21. Malsugenov R.S. "Development of technologies and equipment for gas molding with back pressure of sheet parts" ("Razrabotka tekhnologii i oborudovaniya dlya gazovoy formovki s protivodavleniem tonkolistovykh detaley"), Cand. of Tech. Sciences diss., 05.02.09, Moscow, 2016, 143 p.
22. Botashev A.Yu., Dzhumanazarov E.Kh. "Study of the process using a tubular billet", *Bulletin of North Caucasian State Academy (Izvestiya Severo-Kavkazskoy gosudarstvennoy gumanitarno-tehnologicheskoy akademii)*, Cherkessk, 2018, no. 3, pp. 13-18.

Submitted 22.05.2020; revised 21.08.2020

Information about the authors

- Anvar Yu. Botashev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropol'skaya str., Cherkessk 369001, Russia), e-mail: botashev11@mail.ru
- Rashid A. Bayramukov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropol'skaya str., Cherkessk 369001, Russia), e-mail: melov.mel@mail.ru
- Nazim U. Bisilov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropol'skaya str., Cherkessk 369001, Russia), e-mail: w9187124909@mail.ru
- Eziz Kh. Dzhumanazarov**, Graduate student, North Caucasian State Academy (36 Stavropol'skaya str., Cherkessk 369001, Russia), e-mail: eziz22@mail.ru
- Roman S. Malsugenov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, North Caucasian State Academy (36 Stavropol'skaya str., Cherkessk 369001, Russia), e-mail: malsugenov_roma@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ФИНИШНОЙ АНТИФРИКЦИОННОЙ БЕЗАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

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: износостойкость рабочих поверхностей деталей машин зависит от качества их поверхностей, её можно повысить нанесением покрытий. Для чугунных гильз цилиндров двигателей хорошо себя зарекомендовало покрытие, наносимое методом ФАБО. На основании теории механики резания с использованием модельного эксперимента установлены основные закономерности взаимодействия микронеровностей поверхности с инструментом, позволяющие разработать теоретическую модель для первого этапа финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО) - микрорезания, что обеспечит эффективное протекание процесса и заполнение микровпадин антифрикционным материалом. Отмечено, что при взаимодействии чугунной микронеровности с латунным инструментом происходит затупление вершины микронеровности с формированием радиуса округления. Показан механизм формирования радиуса округления микронеровности, установлена существенная взаимосвязь последнего от переднего угла резания. Обнаружены явления, происходящие на задней поверхности микронеровности. Доказаны пути повышения эффективности процесса микрорезания за счет обеспечения установленных значений переднего угла резания. Нанесение антифрикционных покрытий ФАБО предложено рассматривать с позиций системного подхода и принципов самоорганизации, что позволит прогнозировать достижение оптимальных параметров качества поверхностного слоя: равновесной шероховатости, благоприятного микрорельефа, требуемых упрочнения и остаточных напряжений

Ключевые слова: финишная антифрикционная безабразивная обработка, микрорезание, сила, передний угол, контактное взаимодействие, антифрикционное покрытие

Введение

Одной из наиболее важных и актуальных проблем современного машиностроения является разработка и широкое применение новых, научно-обоснованных, экологических, технически и экономически целесообразных технологий обработки с целью повышения качества рабочих поверхностей за счет достижения оптимальных эксплуатационных свойств. К их основным показателям следует отнести физико-механические и геометрические характеристики поверхностного слоя, формируемые на финишных операциях технологического процесса.

Возрастающие требования к эксплуатационным свойствам рабочих поверхностей деталей стимулируют развитие методов модификации поверхностей и нанесения защитных покрытий. В мировом машиностроении сложилось даже приоритетное направление – нанесение многофункциональных покрытий, а в области науки – направление тонкопленочного материаловедения [1]. Важным требованием, предъявляемым к подобного рода покрытиям, является минимальное трение и высокая изно-

состоятельность, что обеспечит устойчивую работу контактирующих пар трения в условиях граничной смазки и без смазки. Такими свойствами обладают антифрикционные покрытия, полученные финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО) путем фрикционного взаимодействия медьсодержащего инструмента с поверхностью обрабатываемой детали. Натирание поверхности трения инструментом из меди и ее сплавов в присутствии технологической жидкости позволяет обеспечить перенос материала и формирование антифрикционного покрытия толщиной до 5 мкм на поверхность детали, а также упрочнить поверхность основного материала на глубину 70-80 мкм [2].

Применения ФАБО способствует снижению времени приработки и исключению задиров поверхностей трения, повышению несущей способности деталей и соединений, защите поверхности трения от водородного изнашивания, снижению температуры трения и увеличению периода работы узла [3].

Образование антифрикционного покрытия при ФАБО зависит от ряда факторов, в том числе и условий контактирования инструмента с обрабатываемой поверхностью, а форма и размеры микронеровностей определяют каче-

ство полученного покрытия, его сплошность [4]. В этой связи весьма актуальными представляются исследования влияния основных параметров процесса ФАБО на формирование антифрикционного покрытия в зависимости от условий контактного взаимодействия медьсодержащего инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Обзор литературы

Метод ФАБО, известный благодаря работам [2, 3, 5 и др.], нашел широкое распространение в различных отраслях машиностроения, в том числе и при обработке деталей (гильзы цилиндров, коленчатые валы и др.), лимитирующих ресурс двигателей внутреннего сгорания.

Однако, несмотря на определенные успехи практического применения ФАБО, имеются существенные пробелы в изучении закономерностей формирования антифрикционных покрытий, не вскрыты в полной мере роль и особенности пластической деформации и физико-механических процессов в образовании антифрикционных покрытий, а также в переходном и поверхностном слоях основного металла.

Согласно [6, 7] вопрос образования покрытия ФАБО следует рассматривать в три этапа. На первом этапе на поверхность детали наносят поверхностно-активную среду, которая, обладая хорошей смачиваемостью поверхности, способствует размягчению и растворению оксидных пленок на поверхности детали и инструмента. На втором этапе твердое тело (обрабатываемая деталь) контактирует с мягким контртелом (инструментом). При этом происходит изнашивание инструмента вследствие микрорезания шероховатостями поверхности обрабатываемой детали. На третьем этапе, когда впадины обрабатываемой поверхности заполнены, под влиянием адгезионного взаимодействия происходит увеличение толщины слоя покрытия.

Следует отметить, что, несмотря на различие в подходах, объясняющих образование антифрикционного покрытия фрикционно-механическим методом, авторы работ [1-7] отмечают важность и необходимость осуществления микрорезания как основы формирования всего покрытия.

В работе [4] с позиций механики процесса, с использованием модельного эксперимента описан процесс ФАБО на этапе микрорезания, что позволило установить пути повышения эффективности нанесения антифрикционного по-

крытия. В работах [4, 7] доказана целесообразность создания регулярного микрорельефа с положительными значениями переднего угла резания на обрабатываемой поверхности для создания благоприятных условий для микрорезания. В этой связи научный и практический интерес вызывает изучение влияния основных, и прежде всего, силовых характеристик ФАБО и их влияние на процесс микрорезания.

Следует отметить, что в настоящее время метод ФАБО нашел широкое применение при нанесении антифрикционных покрытий на поверхности трения из легированных сталей, в меньшей степени – из чугуна. Наличие в структуре чугуна свободного графита препятствует адгезии антифрикционного покрытия с материалом основы. Учитывая то, что серый чугун широко используется при изготовлении деталей, работающих в паре трения, например, гильз цилиндров, особый интерес представляют исследования, направленные на повышение эффективности ФАБО чугунных изделий.

Целью данной работы является исследование закономерностей взаимодействия микронеровностей контактирующих поверхностей при ФАБО на этапе микрорезания для повышения эффективности ФАБО чугунных гильз ДВС с помощью их латунирования.

Методика проведения исследований

Экспериментальные исследования контактного взаимодействия поверхностей проводились на специальных образцах из серого чугуна СЧ20 и латуни Л63. Учитывая возможность и целесообразность обработки деталей из серого чугуна СЧ20 ФАБО, основная часть экспериментов выполнялась на этом материале. Учитывая пластические свойства, в качестве антифрикционного материала в исследованиях использовалась латунь марки Л63.

Для исследований процесса микрорезания применяли метод теории подобия и размерностей [8-10], в соответствии с которым были изготовлены чугунные резцы, геометрия режущей части которых моделировала отдельную микронеровность поверхности обрабатываемой заготовки. Передний угол моделей микронеровности варьировался в пределах $\gamma = +5^\circ \div -15^\circ$. Микрорезание пластины из латуни Л63 моделировалось с помощью разработанного устройства [4], которое монтировалась на фрезерном станке модели 676П (рис. 1).

Исследуемый образец 1 в форме пластины из латуни Л63 жестко закреплялся на рабочем

столе 2 фрезерного станка (см. рис. 1). Устройство 3 с головкой 4, на которую закреплен сменный резец 5 из серого чугуна СЧ 20, неподвижно устанавливался оправкой 6 в вертикальную бабку 7 станка. Для фиксации усилия прижатия антифрикционного бруска к обрабатываемой поверхности на станке предусмотрена магнитная стойка с индикаторной головкой 8.

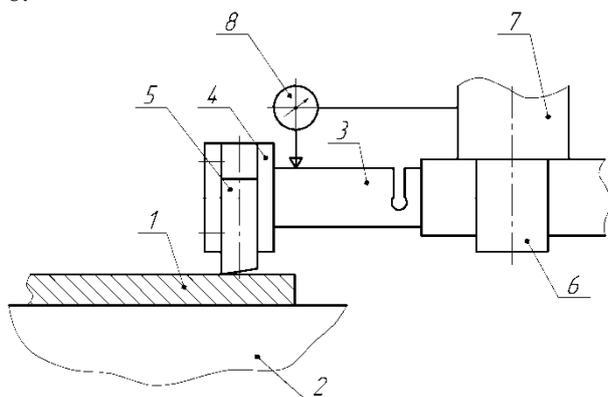


Рис. 1. Схема моделирования процесса микрорезания

Сменный чугунный резец 5 прижимался к внешнему краю пластины 1. Нагрузка на резец 5 обеспечивалась механизмом вертикальной подачи стола станка и контролировалась индикаторной головкой 8. При этом, двигаясь под фиксируемой нагрузкой, чугунный микрорезец срезает слой антифрикционного металла (латуни), тем самым моделируя процесс нанесения латунного покрытия при ФАБО на этапе микрорезания.

Поскольку форма микронеровностей обработанной поверхности при токарной обработке определяется, прежде всего, геометрией резца в плане, то в работе варьировались геометрические параметры режущей части микрорезца и прежде всего его переднего угла резания $\gamma = +5^\circ \div -15^\circ$.

Параметры шероховатости исследуемой поверхности определялись с применением профилографа-профилометра «Talysurf-5». Изучение характера затупления вершины модели микронеровности и микростружки исследуемых образцов выполнялось на металлографических микроскопах МИМ-7 и «Альтами», а также на сканирующем электронном микроскопе ZEISS EVO 50XVP.

Эффективность образования микростружки оценивалась ее объемом V_1 , срезаемым с единицы площади в 1 мм^2 , а также установленным авторами данной работы параметром – объемным КПД.

Результаты исследований

Рассмотрим контактное взаимодействие единичной микронеровности, образованной при обработке поверхности из латуни Л63 резцом из чугуна СЧ20. В начале процесс микрорезания осуществляется острозаточенным резцом, исходный радиус режущей кромки которого находится в пределах $r = 0,008 \div 0,015 \text{ мм}$. Он значительно меньше значения толщины снима t_p . Схема взаимодействия такого резца с поверхностью латунного образца приведена на рис. 2.

Как следует из рис. 2, контур режущего клина состоит из следующих частей: AB – прямолинейная часть контура передней поверхности, заточенная с передним углом $\gamma > 0$; BC – скругленная часть передней поверхности, в которой $\gamma > 0$; CD – скругленная часть контура задней поверхности, в которой задний угол $\alpha < 0$; DE – часть контура задней поверхности, образованная в результате ее износа; EF – часть прямолинейного контура задней поверхности, у которой задний угол $\alpha > 0$. Длина этого участка практически определяется процессом пластического восстановления поскольку величина упругого восстановления обрабатываемого материала $d_{упр} \ll d_{нл}$.

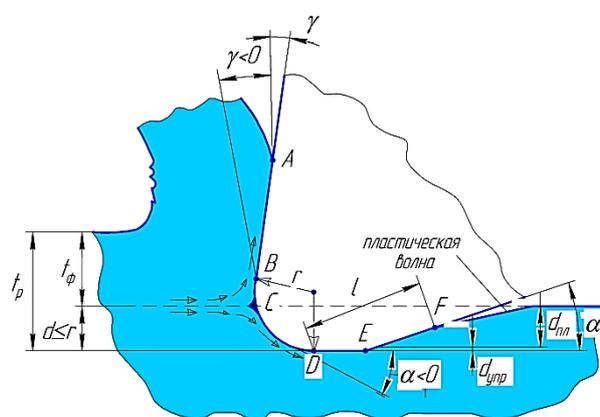


Рис. 2. Схема взаимодействия единичной микронеровности с обрабатываемой поверхностью при ФАБО

Таким образом, передняя поверхность режущего клина состоит из двух частей $L=AB+BC$, а его задняя поверхность длиной L_1 состоит из трех частей $L_1=CD+DE+EF$. Точка C соответствует разделу передней и задней поверхностей клина.

Согласно данным [11], наплывающий на режущий клин материал заготовки в точке C делится на два потока, один из которых перемещается по передней поверхности инструмен-

та, а второй слой, толщиной d , деформируется задней поверхностью режущего клина. В этом случае реальная поверхность среза проходит через точку C и фактическая глубина реза не совпадает с номинальной толщиной t_p поверхностного среза.

Автор [11] рекомендует определять положение точки C и величину значения d последовательным уменьшением толщины срезаемого слоя до момента прекращения образования микростружки.

В нашем случае точка C является точкой раздела всего снимаемого слоя толщиной t_p на слой материала, который уходит в микростружку с фактической глубиной резания t_ϕ и на слой, который обрабатывается поверхностным пластическим деформированием радиусным участком задней поверхности. Его величина $d \leq r$, то есть $t_p \sim t_\phi + r$, где r – радиус затупления вершины резца, который изменяется в процессе работы.

Экспериментальные исследования показали, что с уменьшением переднего угла резания γ радиус округления микрорезца увеличивается (рис. 3). Это свидетельствует о том, что режущее лезвие чугунного резца интенсивно изнашивается в процессе взаимодействия с латунной поверхностью, причем это происходит уже в самом начале взаимодействия, а само изнашивание носит характер микровыкрашивания, которое вскоре после стабилизации формы затупления ненадолго переходит во фрикционный износ. После чего на контактной поверхности налипает слой латуни, который играет роль твердой смазки, и форма режущего клина окончательно стабилизируется.

Отметим, что такая форма режущего лезвия соответствует принципу самоорганизации процесса [12, 13], а следовательно, и минимуму мощности микрорезания.

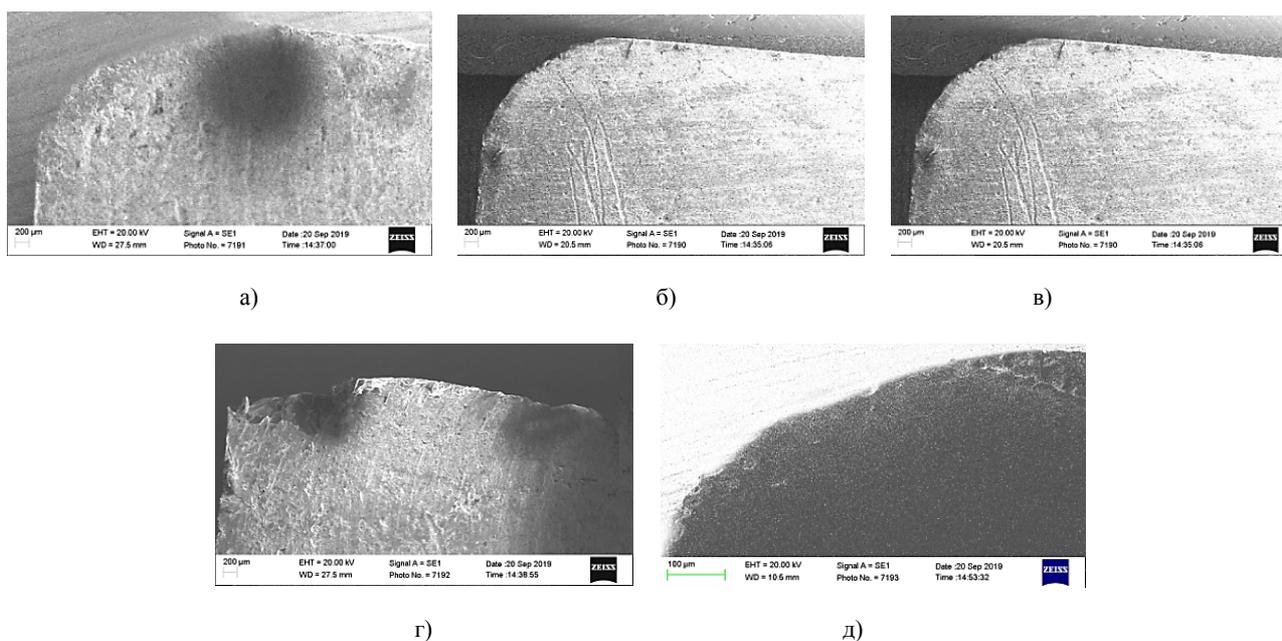


Рис. 3. Радиус округления микрорезца из чугуна СЧ 20 при переднем угле резания γ : а) $\gamma = +5^\circ$; б) $\gamma = 0^\circ$; в) $\gamma = -5^\circ$; г) $\gamma = -10^\circ$; д) $\gamma = -15^\circ$; $\times 50$

Проведенные эксперименты при моделировании процесса ФАБО на этапе микрорезания, показали, что интенсивный износ чугунного резца происходит в самом начале обработки. После чего величина r – радиуса затупления режущей кромки резца, остается практически постоянной. Этому способствует то, что у инструмента на участке контакта ADE (рис. 2) из-за высокого контактного давления, превышающего в три раза предел текучести латуни и примерно равного ее твердости HV , появляется пленка из адгезионно налипшей латуни. По-

следняя начинает играть роль твердой смазки, предотвращая дальнейшее затупление микроворшины и стабилизируя значение радиуса r .

Экспериментально для описанного взаимодействия пары «чугун-латунь» установлено, что величина r зависит только от переднего угла резания γ . Зависимость отношения радиуса затупления r к фактической глубине резания t_ϕ от угла γ показана на рис. 4.

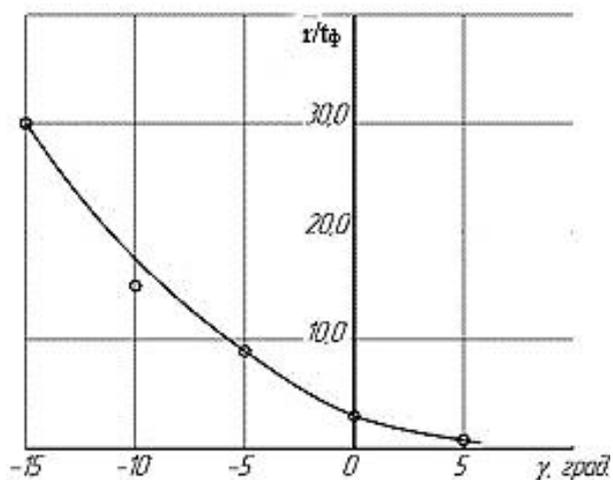


Рис. 4. Зависимость отношения радиуса затупления режущей кромки резца r к фактической глубине резания t_ϕ от переднего угла резания γ при моделировании резцом из чугуна СЧ 20 при обработке латуни Л63

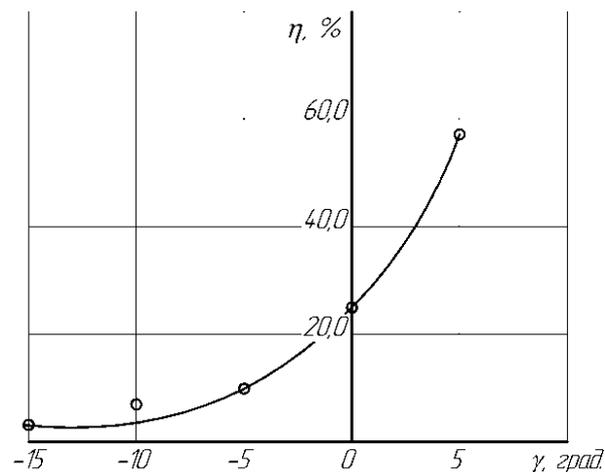


Рис. 5. Зависимость объемного КПД микрорезания η от переднего угла резания γ при моделировании микрорезания резцом из чугуна СЧ20 образца из латуни Л63

Эффективность микрорезания при ФАБО можно оценить параметром $\eta = \frac{t_\phi}{t_p} = \frac{t_\phi}{t_\phi + r}$, который можно назвать объёмным КПД микрорезания. Зависимость объёмного КПД η от переднего угла резания γ представлена на рис. 5.

Очевидно, что об эффективном микрорезании при ФАБО можно говорить только при $\gamma \geq 0^\circ$.

Полученные экспериментальные данные позволили представить графические схемы взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью при ФАБО на этапе микрорезания при различных передних углах резания γ (рис. 6). Анализ полученных данных позволил заключить, что при отрицательных углах резания γ радиус затупления режущей кромки резца r увеличивается, а фактическая глубина резания t_ϕ – уменьшается.

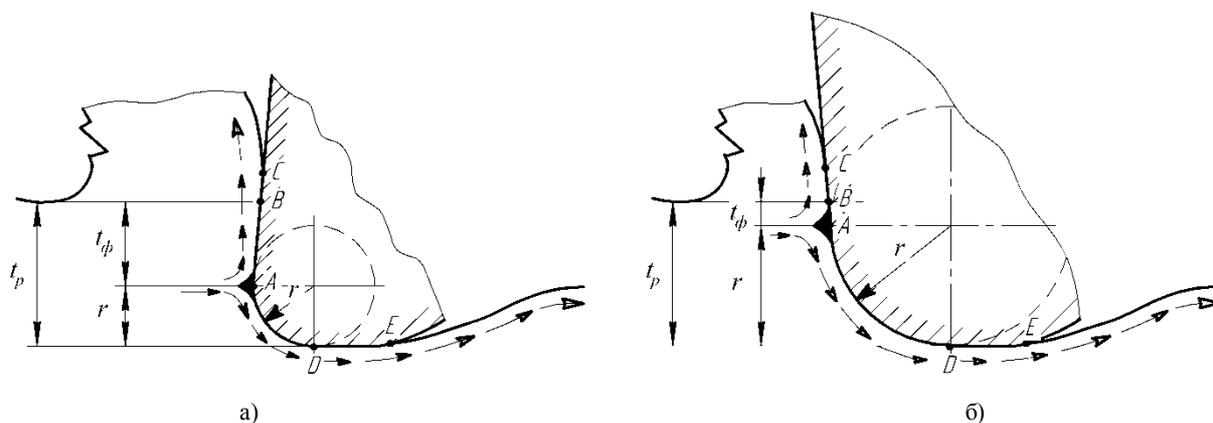


Рис. 6. Схема взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью при ФАБО на этапе микрорезания при различных передних углах резания γ : а) $\gamma = +5^\circ$; б) $\gamma = -5^\circ$

Из рис. 7 следует, что фактическая толщина среза при уменьшении значений γ от $+5^\circ$ до -5° уменьшается пропорционально углу, а затем монотонно уменьшается до 0 при значении $\gamma = -15$. Это объясняется интенсивным формированием радиуса износа режущей кромки (рис. 4). Следовательно, для интенсификации первого этапа стружкообразования ФАБО единичные микронеровности обрабатываемой поверхности

должны взаимодействовать с латунной поверхностью имея угол $\gamma \geq 0^\circ$.

Экспериментальное определение зависимости силового параметра – силы P_y , во многом определяющей условия протекания микрорезания при различных углах γ , показало следующее.

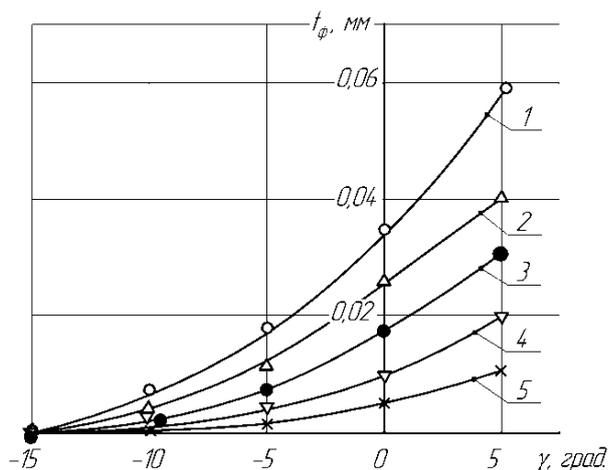


Рис. 7. Зависимость фактической толщины среза t_ϕ от переднего угла резания γ при моделировании микрорезания микрорезцом из чугуна СЧ20 поверхности латуни Л63 при номинальных толщинах среза $t_{ном}$, мм: 1 – 0,6; 2 – 0,4; 3 – 0,3; 4 – 0,2; 5 – 0,1

При положительных углах γ удается достигнуть больших глубин микрорезания при значительно меньших усилиях P_y (рис. 8).

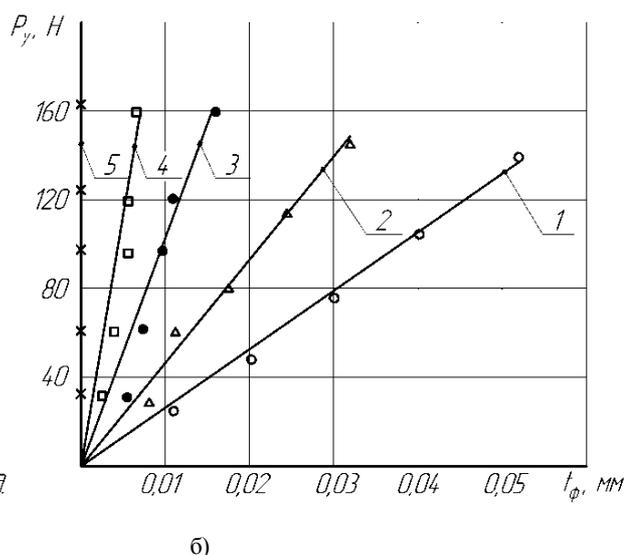
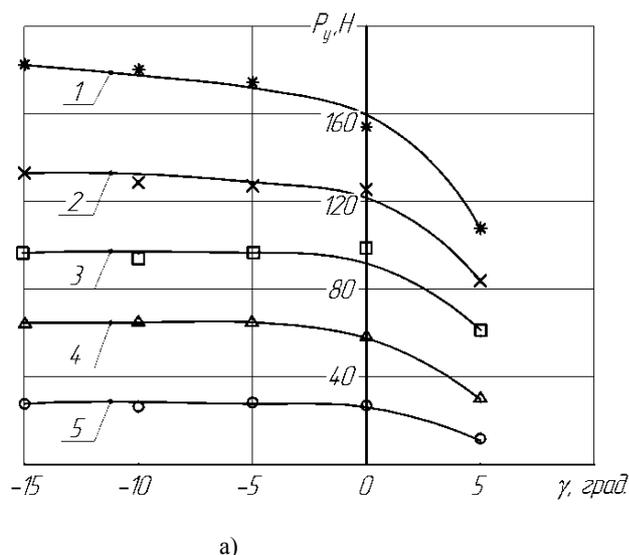


Рис. 8. Зависимость усилия P_y : а - от угла γ (глубина резания t_p , мм: 1 – 0,6; 2 – 0,4; 3 – 0,3; 4 – 0,2; 5 – 0,1); б - от фактической глубины резания t_ϕ (угол резания γ : 1 – 5° ; 2 – 0° ; 3 – -5° ; 4 – -10° ; 5 – -15°) при моделировании микрорезания резцом из чугуна СЧ20 образца из латуни Л63

Исходя из рис. 8, б связь силы P_y с толщиной резания t_ϕ можно выразить следующей зависимостью

$$P_e = C_f \cdot t_f, \quad (1)$$

где C_f – коэффициент, учитывающий влияние угла, аппроксимированный следующей зависимостью:

$$C_f = 86,9\gamma^2 - 883\gamma + 4896. \quad (2)$$

Для получения безразмерной \bar{P}_n использованы методы теории подобия и размерностей

Как следует из рис. 8, зависимость P_y от угла γ имеет качественно подобный характер при разных толщинах резания t_p . Минимальное значение P_y независимо от номинальной толщины резания $t_{ном}$ наблюдается при угле $\gamma = +5^\circ$. С уменьшением угла γ до 0° значение P_y возрастает и дальнейшее уменьшение угла γ мало влияет на ее рост. Следует отметить, что при больших толщинах среза ($t_p = 0,4 - 0,6$ мм) интенсивность изменения P_y при γ от 0° до -15° несколько возрастает.

Зависимости P_y от фактической толщины среза t_ϕ (рис. 8, б) имеют линейный характер. С уменьшением угла γ при постоянном усилии величина t_ϕ снижается, что объясняется ухудшением условий резания, резко возрастает износ режущей кромки с образованием радиуса затупления r вершины резца, причем наиболее интенсивно это происходит при отрицательных углах γ .

[8-10]. Нормальная составляющая силы P_n , определяющая технологическое усилие прижима бруска к заготовке, зависит от рода натираемого материала, глубины микрорезания t , ширины стружки B , геометрии микровыступа (прежде всего переднего угла резания γ и радиуса затупления r), условий трения, которые определяются коэффициентом трения f .

Механические свойства упрочняемого материала хорошо определяются таким обобщающим параметром, как твердость HV . В работе

[9] ее использовали для анализа силовых параметров при деформирующем протягивании, а в [10] при резании.

Запишем функциональную зависимость

$$P_n = P_n(HV, t, B, r, \gamma, \alpha). \quad (3)$$

В соответствии с теорией размерностей [8] выбираем основные (определяющие) параметры: t (м), HV (Н/м²). Остальные параметры выражаем через эти два основные. Линейные размерности выражаем в единицах t , а углы γ и коэффициент трения f уже являются безразмерными. Тогда в соответствии с [8]:

$$P_n = HV^a \cdot t^b \cdot \overline{P}_n \left[1, 1, \frac{B}{t}, \frac{r}{t}, \gamma, \alpha, f \right]. \quad (4)$$

Здесь \overline{P}_n является безразмерной (относительной) силой, которую необходимо определить из модельного эксперимента.

Чтобы размерности левой и правой частей (4) были одинаковыми, выбираем показатели степеней: $a=1$; $b=2$:

$$P_n = HV \cdot t^2 \cdot \overline{P}_n. \quad (5)$$

Из принципов суперпозиции очевидно, что \overline{P}_n от ширины резания $\frac{B}{t}$ должна зависеть линейно. Тогда (5) принимает вид

$$P_n = HV \cdot t \cdot B \cdot \overline{P}_n \left[\gamma, \alpha, \frac{r}{t}, f \right]. \quad (6)$$

В модельном эксперименте угол α был постоянным, как и коэффициент трения f . Радиус затупления r определяли экспериментально и как показано ниже, он зависит только от переднего угла резания γ . Ширина $B=3$ мм во всех случаях была постоянной.

Тогда безразмерное усилие

$$\overline{P}_n \left[\frac{r}{t}, \gamma \right] = \frac{P_n}{HV \cdot t \cdot B}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что безразмерная сила для каждого угла γ есть величина постоянная. Твердость образца из латуни Л63 $HV=690$ МПа. Зависимость P_n от γ , определенная по (7), представлена на рис. 9.

Зависимость (7) с учетом (2) можно аппроксимировать как

$$P_n = 0,042\gamma^2 - 0,433\gamma + 2,4, \quad (8)$$

что позволяет определять силу P_y для любого материала и режимов резания, используя зависимость (7).

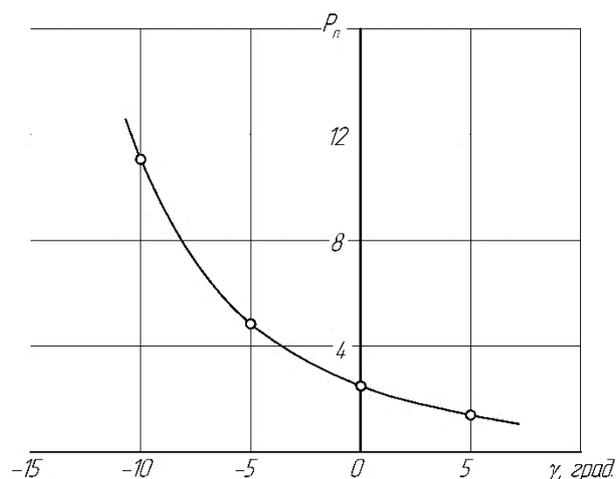


Рис. 9. Зависимость безразмерной силы \overline{P}_n от угла γ при моделировании микрорезания резцом из чугуна СЧ20 образца из латуни Л63

Получим зависимости для расчета сил микрорезания реального процесса ФАБО. Пусть сформирован регулярный микрорельеф поверхности, обрабатываемой ФАБО. Расстояние между микровыступами равно S , а ширина и длина латунного бруска равны, соответственно, B и L .

Если технологическая сила прижима инструмента $P_{n\Sigma}$ приложена в статическом центре давления, то силы P_n , действующие на каждую микронеровность, распределены равномерно и одинаковы на каждом микровыступе. Значит и фактическая глубина микрорезания t_ϕ будет одинаковой для всех микрорезцов.

Число микровыступов

$$N = \frac{L}{S}, \quad (9)$$

где L – длина латунного бруска;
 S – расстояние между микровыступами.

Сила

$$P_n = \overline{P}_n(\gamma) \cdot B \cdot t_\phi \cdot HV, \quad (10)$$

где B – ширина и длина латунного бруска;
 HV – твердость по Виккерсу.

Технологическое усилие

$$P_{n\Sigma} = P_n \cdot N = \overline{P}_n(\gamma) \cdot HV \cdot B \cdot t_\phi \cdot \frac{L}{S}. \quad (11)$$

Тогда толщина срезаемого слоя

$$t_\phi = \frac{P_{n\Sigma} \cdot S}{P_n(\gamma) \cdot B \cdot L \cdot HV}. \quad (12)$$

Объем микростружки, срезаемый одним микровыступом

$$V_1 = t_\phi \cdot L \cdot B = \frac{P_{n\Sigma} \cdot S}{P_n(\gamma) \cdot HV}. \quad (13)$$

Микростружка заполняет микровпадину между двумя вершинами. Если учесть неплотность заполнения впадины микростружкой поправочным коэффициентом $b_1 > 1$, то

$$V_1 = \frac{P_{n\Sigma} \cdot S \cdot b_1}{P_n(\gamma) \cdot HV}. \quad (14)$$

Как видно V_1 не зависит от размеров натирающего бруска B и L .

Площадь поперечного сечения микровпадины, заполненная стружкой

$$S_1 = \frac{V_1}{B} = \frac{P_{n\Sigma} \cdot S \cdot b_1}{P_n(\gamma) \cdot B \cdot HV}. \quad (15)$$

Если S_{01} – площадь микровпадины, то процесс ее заполнения микростружкой можно представить следующим образом

$$\Delta S_1 = \frac{S_1}{S_{01}} \cdot 100\% = \frac{P_{n\Sigma} \cdot S \cdot b_1}{P_n(\gamma) \cdot B \cdot HV} \cdot 100\%. \quad (16)$$

Представленные зависимости (14-16) позволяют выполнять технологические расчеты производительности первого этапа ФАБО – микрорезания.

Выводы

1. Экспериментально установлены закономерности взаимодействия микронеровостей обработанной поверхности с инструментом при ФАБО, которые определяются принципом приспособляемости системы «инструмент - заготовка»:

- показано, что при взаимодействии чугуной микронеровности с латунным инструментом практически сразу происходит формирование затупленной вершины микронеровности с радиусом округления, который в дальнейшем остается практически неизменным;

- на начальном этапе за счет микроразрушений происходит формирование радиуса округления, который после достижения оптимального с точки зрения минимума энергетики процесса микрорезания заканчивает свое формирование за счет износа от сил трения. Причем, радиус округления режущей кромки напрямую зависит от значений переднего угла резания γ .

2. С точки зрения максимальной эффективности процесса микрорезания и заполнения впадин между микронеровностями их геометрия должна обеспечивать передний угол резания $\gamma = 0 \div +5^\circ$.

3. Выявленные закономерности взаимодействия микронеровностей чугуной заготовки с латунным инструментом позволяют разра-

ботать теоретическую модель для первого этапа ФАБО - микрорезания, что обеспечит эффективное протекание процесса микрорезания и заполнения микровпадин натираемым материалом.

4. Предложено рассматривать процесс ФАБО с позиций системного подхода и принципов самоорганизации, что позволит прогнозировать достижение оптимальных параметров качества поверхностного слоя: равновесной шероховатости, благоприятного микрорельефа, требуемых упрочнения и остаточных напряжений.

5. Установлена взаимосвязь между углом γ , толщиной микрорезания t и усилием P_y , действующим на единичную микронеровность. При положительных углах γ удается достигнуть больших глубин микрорезания, а значит, и эффективности этого процесса при значительно меньших усилиях P_y . Зависимость P_y от угла γ имеет качественно подобный характер при разных толщинах микрорезания.

6. Установлена пропорциональность связи между силой P_y и фактической толщиной микрорезания t_f , доказывающая возможность использования для получения безразмерного значения силы \overline{P}_n методов теории подобия и размерностей.

7. Получена аналитическая зависимость для определения безразмерной силы \overline{P}_n , позволяющая определить значение силы для любого материала и режимов микрорезания.

8. Получены расчетные зависимости для определения технологических усилий при реальном процессе ФАБО.

Литература

1. Соловых Е.К. Тенденции развития технологий поверхностного упрочнения в машиностроении. Кировоград: КОД, 2012. 92 с.
2. Балабанов В.И., Болгов В.Ю., Ищенко С.А. Нанесение трением нано-размерных антифрикционных покрытий на детали машин // Нанотехнологии, экология, производство. 2010. № 3. С. 30-34.
3. Гаркунов Д.Н. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) поверхностей трения деталей // РВМ (Ремонт. Восстановление. Модернизация). 2009. № 3. С. 36-41.
4. Моделирование контактного взаимодействия микронеровностей при ФАБО / И. Шепеленко, Я. Немировский, Ю. Цеханов, Э. Посвятенко // Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: Збірник тез доповідей I-ї Міжнародної науково-технічної конференції. м.Вінниця, 2019. С. 218-219.
5. Готтлиб Польцер Основы фрикционного нанесения покрытия в условиях селективной передачи // РВМ

(Ремонт. Восстановление. Модернизация). 2010. № 10. С. 23-28.

6. Погонишев В.А., Панов М.В. Теоретические и экспериментальные основы повышения износостойкости деталей машин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2011. № 4. С. 78-84.

7. Shepelenko I.V., Posviatenko E.K., Cherkun V.V. The mechanism of formation of anti-friction coatings by employing friction-mechanical method, Zhurnal Problems of Tribology, Hmel'nits'kij. 2019. no. 1. pp. 35-39.

8. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 423 с.

9. Цеханов Ю.А., Шейкин С.Е. Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2001. 201 с.

10. Цеханов Ю.А. Моделирование энерго-силовых параметров резания методами теории подобия и размерностей // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 2. С. 27–30.

11. Розенберг Ю.А. Механика процесса резания. Курган: Изд-во Курганского университета, 2005. 193 с.

12. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. Минск, 1985. Т. VI. № 2. С. 201-212.

13. Якубов Ф.Я., Ким В.А. Структурно-энергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента. Симферополь: Крымское уч.-пед. государственное изд-во, 2005. 300 с.

Поступила 03.07.2020; принята к публикации 21.08.2020

Информация об авторах

Цеханов Юрий Александрович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tsekhanov@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1315-8491>

Подоприхин Михаил Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), 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, проспект 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, проспект Университетский, 8), e-mail: provotorova.1951@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8005-8584>

PECULIARITIES OF INTERACTION OF MICROASPERITIES OF CONTACTING SURFACES DURING FINISHING ANTI-FRICTIONAL ABRASION-FREE TREATMENT

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 wear resistance of the working surfaces of machine parts depends on the quality of their surfaces; it can be increased by coating. For cast iron engine cylinder liners, a coating applied by the FANT method has proven itself well. On the basis of the theory of cutting mechanics using a model experiment, the main regularities of the interaction of surface microasperities with a tool were established, which make it possible to develop a theoretical model for the first stage of the finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT) - microcutting, which will ensure the effective flow of the process and filling the micro-cavities with antifriction material. It is noted that when the cast-iron microroughness interacts with a brass tool, the microasperity's top becomes dull with the formation of a rounding radius. The mechanism of the formation of the rounding radius of microasperity is shown, a significant relationship between the latter and the front cutting angle is established. The phenomena occurring on the rear surface of microroughness are found. The ways of increasing the efficiency of the microcutting process by ensuring the set values of the cutting rake are proved. It is proposed to consider the application of FANT antifriction coatings from the standpoint of a systematic approach and the principles of self-organization, which will make it possible to predict the achievement of optimal quality parameters of the surface layer: equilibrium roughness, favorable microrelief, required hardening and residual stresses

Key words: finishing antifriction non-abrasive treatment, micro-cutting, power, cutting angle, contact interaction, antifriction coating

References

1. Solovykh E.K. "Trends in the development of technologies for surface hardening in mechanical engineering" ("Tendentsii razvitiya tekhnologiy poverkhnostnogo uprochneniya v mashinostroenii"), Kirovograd, KOD, 2012, 92 p.

2. Balabanov V.I., Bolgov V.J., Ishchenko S.A. "Friction application of nanoscale antifriction coatings on parts", Nanotechnology, Ecology, Production (Nanotekhnologii, ekologiya, proizvodstvo) 2010, no. 3, pp. 30–34.

3. Garkunov D.N. "Finishing antifriction non-abrasive treatment (FANT) of friction surfaces of parts", RRM (Repair. Restoration. Modernization) (RVM (Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya)), 2009, no. 3, pp. 36–41.
4. Shepelenko I., Nemirovskiy Ya., Tsekhanov Yu., Posvyatenko E. "Modeling of contact interaction of micro roughness at FANT", I-th International Scientific and Technical Conference «Prospects for the Development of Mechanical Engineering and Transport-2019», 2019, pp. 218–219.
5. Gottlib Polcer "Fundamentals of friction coating under conditions of selective transmission", RRM (Repair. Restoration. Modernization) (RVM (Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya)), 2010, no. 10, pp. 23–28.
6. Pogonyshov V.A., Panov M.V. "Theoretical and experimental basis for increasing the wear resistance of machine parts", Mechanics and Physics of Processes on the Surface and in Contact of Solids, Parts of Technological and Energy Equipment (Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya), 2011, no. 4, pp. 78–84.
7. Shepelenko I.V., Posvyatenko E.K., Cherkun V.V. "The mechanism of formation of anti-friction coatings by employing friction-mechanical method", Zhurnal Problems of Tribology, 2019, no. 1, pp. 35-39. DOI: 10.31891/2079-1372-2019-91-1-35-39.
8. Sedov L.I. "Methods of similarity and dimensions in mechanics" ("Metody podobiya i razmernosti v mekhanike"), Moscow, Nauka, 1987, 423 p.
9. Tsehanov Ya.A., Sheykin S.E. "Mechanics of the shape-formation of workpieces during deforming broaching" ("Mekhanika formoobrazovaniya zagotovok pri deformiruyushchem protyagivani"), 2001, 201 p.
10. Tsehanov Ya.A. "Modeling of energy-power parameters of cutting by methods of the theory of similarity and dimensions", [Bulletin of Voronezh State Technical University](#) (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta), 2015, vol. 11, no. 2, pp. 27-30.
11. Rozenberg Yu.A. "The mechanics of the cutting process" ("Mekhanika protsessa rezaniya"), Kurgan University Publishing House, 2005, 193 p.
12. Kostetskiy B.I. "Structural and energetic adaptability of materials during friction", Friction and Wear (Treniye i iznos), 1985, no.2, pp. 201-212.
13. Yakubov F.Ya., Kim V.A. "Structural and energetic aspects of hardening and increasing the durability of the cutting tool" ("Strukturno-energeticheskie aspekty uprochneniya i povysheniya sto-kosti rezhushchego instrumenta"), Simferopol, Crimean Educational and Pedagogical State Publishing House, 2005, 300 p.

Submitted 03.07.2020; revised 21.08.2020

Information about the authors

Yuriy A. Tsekhanov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, 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 (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, 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 Universitetskoy Avenue, 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 Universitetskoy Avenue, Kropivnitskiy 25006, Ukraine), e-mail: provotorova1951@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8005-8584>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АВТОКЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ю.В. Нефедов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются вопросы целесообразности проведения натуральных экспериментов при мелкосерийном производстве полимерно-композитных материалов в установках автоклава, что позволяет получить необходимые значения параметров управления процессом формовки с меньшим количеством затраченных средств, времени, а также с наименьшей погрешностью. Основное внимание уделено учету факторов, влияющих на динамику изменения базовых параметров процессов автоклавирования, которые зависят как от особенностей реализации установки, так и от индивидуальных настроек системы автоматического управления основными агрегатами установки. Для повышения эффективности технологического процесса на аппаратном уровне было предложено использование системы частотного регулирования электропривода основного вентилятора типовой установки автоклава. Такое решение дает возможность снизить потери электроэнергии, эффективно скоординировать управление нагревательной и вентиляторной групп установки, а также ускорить проведение единичного цикла автоклавирования полимерно-композитных материалов. В свою очередь, реализация нескольких циклов автоклавирования в качестве натурального эксперимента дает возможность проведения анализа полученных данных и выработки необходимых управляющих параметров управления процессом формирования полимерно-композитного материала с достаточной точностью и с меньшим количеством затрат по времени. Показано, что данная минимизация затрат при достижении заданного качества полимерно-композитного материала в условиях малого производства достигается за счет корректировки индивидуальных настроек системы автоматического управления нагревательной и вентиляторной групп установки автоклавирования

Ключевые слова: метод натурального эксперимента, технологический процесс автоклавирования, настройки системы автоматического управления

Введение

Основой для производства самолетов, крылатых ракет, космических кораблей и широкого спектра предметов домашнего обихода, послужил легкий, высокопрочный полимерно-композитный материал (ПКМ), состоящий из переплетенных нитей углеродного волокна в матрице смол. Углепластик имеет плотность от 1450 кг/м³ до 2000 кг/м³, что по удельным характеристикам превосходит легированную сталь марки 25ХГСА почти в два раза, а по массе – в пять раз меньше. Из-за того, что изделие на момент формирования находится в матрице, пропитанной полимером, оно свободно может принять форму одинарной и двойной кривизны. Объемы и размеры, а соответственно и стоимость изготавливаемой детали, могут быть весьма значительны (обтекатель космических ракет имеет в диаметре пять метров и в высоту семнадцать метров).

Основным недостатком такого материала является сложность и дороговизна самого процесса формирования изделий. Отклонения от технологических параметров в процессе производства углепластика приводят к появлению брака, к возгоранию внутри автоклавной уста-

новки и значительным экономическим потерям. Как следствие, в производстве ПКМ необходима реализация сложных, дорогостоящих систем управления и контроля качества изделия, которые обеспечат стабильность и отлаженность технологического процесса автоклавного формирования.

Постановка задачи

Описанная выше задача контроля качества изделий и управления производственным процессом автоклавного формирования на практике решается с привлечением методов как имитационного моделирования, так и натурального экспериментирования [1–4]. Задача данного исследования – подтверждение целесообразности по временным и материальным затратам использования методики именно натурального экспериментирования для мелкосерийного производства ПКМ с использованием модернизированной системы управления.

Решение сформулированной задачи

Мелкосерийное производство в автоклавной установке полимерно-композитного материала имеет свои особенности, связанные, как правило, с формовкой единичного изделия от-

лично по своим параметрам и характеристикам от серийных изделий (в том числе и энерго-экономическим)[5,6]. При этом соответствующие управляющие значения и задаваемые уставки, необходимые для корректной

работы системы управления процессом автоклавного формования, приходится рассчитывать и задавать вручную каждый раз с учетом конкретных требований (рецепта, рис. 1).

Сегмент	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Технологический шаг	Старт/Стоп	В дейст.	Старт/Стоп												
Время сегмента	0:00:00	0:05:00	0:10:00	2:00:00	4:30:00	0:10:00	0:05:00	0:20:00	3:30:00	0:15:00	0:45:00	2:30:00	0:05:00	1:00:00	0:00:00
Температура воздуха, [°C]	20,0	20,0	20,0	110,0	110,0	110,0	110,0	145,0	145,0	175,0	175,0	30,0	30,0	20,0	20,0
Давление: [бар]	0,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0
Вакуум: [бар]	-0,95	-0,95	-0,95	-0,95	-0,95	-0,65	-0,55	-0,55	-0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SP-Разн. темп.: [°C]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Термо-голова: [°C]	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
контроль детали:	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Выкл.

Рис. 1. Типовое задание основных параметров технологического процесса (рецепт)

Тем не менее реализация оптимального набора параметров и их реализация системой управления основывается на единой базе сложных физических и математических процессов, описываемых известными законами термодинамики, теплофизики и электротехники. Эти закономерности достаточно проблемные для проведения аналитического анализа (с точки зрения человеко-машинных затрат и точности), и практическая эффективность построения имитационных и математических моделей, как правило, низка [7-10].

Именно поэтому реализация ряда натуральных экспериментов на мелкосерийном автоклавном производстве дает возможность проведения анализа полученных данных и выработки необходимых управляющих параметров управления процессом формования полимерно-композитного материала с достаточной точностью и с меньшим количеством затрат по времени.

Основными технологическими параметрами для системы управления автоклавом (которые необходимо изменять и контролировать) являются:

- а) давление;
- б) температура воздуха (или среды, например: азота) в автоклавной емкости;
- в) поддержание вакуума в «пакете» формирующегося изделия;
- г) управление воздухообменом в автоклаве, посредством регулирования скорости вентилятора.

Технологически процесс реализуется следующим образом.

В сосуде автоклава, с помощью компрессорной установки, создается необходимое давление (максимально - 1,25 МПа, что соответствует ~10 атмосферам). Параметр давления варьируется в диапазоне 2-9 атмосфер и зависит

от рецептурного значения уставки по давлению при «запекании» композитного материала.

Формовка и пропитка полимерно-композитного изделия реализуются поддержанием температуры в автоклаве на заданном уровне - 170 °C с помощью группы термоэлектрических нагревателей (ТЭН мощностью P = 295 кВт), нагруженных на трехфазную сеть. Изменение уровня нагрева осуществляется с помощью тиристорных регуляторов мощности.

Для создания условий равномерного нагрева группой термоэлектрических нагревателей полимерно-композитного материала предусмотрена принудительная циркуляция воздуха (азота) внутри автоклава, реализуемая вентиляторами на основе асинхронного электропривода.

Для снижения потерь электроэнергии и оптимизации технологического процесса на аппаратном уровне было предложено использование системы частотного регулирования электропривода вентиляторной группы установки автоклава. Такое решение дает возможность не только снизить затраты на производство, но и эффективно скоординировать управление нагревательной и вентиляторной групп установки, и тем самым существенно ускорить проведение единичного цикла автоклавирования полимерно-композитных материалов за счет более быстрого установления требуемого температурного режима. Необходимая скорость потока воздуха реализуется путем регулирования оборотов асинхронного двигателя (АД, мощность P= 45 кВт) вентилятора преобразователем частоты (система «ПЧ-АД»). Система «ПЧ-АД» обеспечивает не только оптимальное регулирование потока воздуха, но и энергосбережение, а также защитные функции самого электропривода. Данное аппаратное решение было расширено в области оптимизации структуры системы

управления «ПЧ-АД». Был реализован контур обратной связи ПИД-регулирования скорости потока воздуха в автоклаве с учетом тепловой инерционности его емкости. Это позволило решить проблемы синхронизации нагрева ТЭН и скорости воздушного потока с технологическими требованиями (рецептами) для каждой серии изделий из ПКМ. Предложенный контур ПИД-регулирования позволяет оптимально форсировать процессы нагрева и охлаждения рабочей зоны автоклава, что сокращает длительность переходных процессов (а следовательно, и время каждого единичного цикла формования изделия) на 15% - 25% (рис. 4).

Отметим, что в процессе отладки была установлена постоянная для всех рецептов интегрирующая составляющая ПИД-регулятора, которая учла большую тепловую инерционность самого объекта управления (емкость автоклава). Но чтобы добиться точного и оптимального управления основными технологическими параметрами в автоклавной установке, необходимо учитывать не только ее технические характеристики, но и особенности основного термодинамического процесса для каждого варианта изделия и рецепта.

Алгоритм работы системы управления автоклавной установки формируется на основе требуемых по технологии параметров температуры и давления. Температура определяется нагревом воздуха и характеризуется большой тепловой инерцией самого материала и в еще большей степени геометрией и исполнением рабочей зоны самого автоклава. Таким образом, тепловая инерция определяется свойствами композитного материала, связанными со способностью передавать тепло (энергию) от более теплых частиц нагреваемого воздуха и внешней поверхности композитного материала к менее нагретым и увеличением объема композитного материала с ростом температуры [11]. Свойства изготавливаемого изделия определяются термодинамическим процессом, который всегда сопровождается изменением одного из макроскопических и взаимосвязанных параметров (давления P , объема V или температуры T), которое приводит к изменению двух других параметров по известным газовым законам Шарля и Гей-Люссака [12].

Как было отмечено выше, процесс получения ПКМ включает ряд технологических стадий, выполняемых последовательно. Причем каждая предыдущая стадия оказывает прямое влияние на протекание процессов на последующих стадиях и на эксплуатационные характеристики ПКМ.

Существует большое количество методов формообразования изделий из ПКМ и каждый имеет свою строго определенную рецептуру (алгоритмы изменения параметров давления и температуры) в течение времени каждой стадии. Кроме того, необходимо учитывать, что увеличение температуры в емкости автоклавной установки приводит к увеличению давления газа (при неизменном объеме и массе газа), возможности создания аварийной ситуации, вплоть до разрушения емкости.

Таким образом, основные трудности производства ПКМ (особенно для мелких серий) связаны с требованиями точности поддержания технологических алгоритмов в соответствии с рецептурой и параметрами (размеры, геометрия и т.д.) самого изделия. Существует большая инвариантность динамического изменения всех величин, характеризующих состояние газовой среды, окружающей изделие. Как уже было отмечено, заранее определить все необходимые закономерности такого динамического изменения с помощью математических расчетов и имитационного моделирования крайне затруднительно [3, 4, 9, 10]. Так, например, для подборки требуемых параметров рецепта для типовой мелкой серии ПКМ обычно проводится от 5 до 10 дорогостоящих полных циклов формования.

Для сокращения производственных расходов, было предложено использовать метод натурального экспериментирования, который позволяет менее затратно определить технологические алгоритмы в соответствии с рецептурой и параметрами каждого изделия. При этом используются экспертные оценки и данные аналогичных, ранее реализованных стадий автоклавного производства. Для сокращения инвариантности методология проведения экспериментирования основывается на анализе протекающих процессов, в которых один из параметров, упомянутых выше, поддерживается постоянным. На основании ранее изложенного были проведены натурные испытания в реальных условиях на автоклавной установке [6].

Методика испытаний строилась следующим образом: варьируемым параметром выступала температура среды в автоклавной установке, на основании изменений температуры анализировались динамические параметры давления. Следующий этап строился от обратного, управляемым параметром было давление в автоклаве, на основании этих изменений снимались текущие параметры температуры среды в емкости. В результате проведения серии натурных испытаний (для единичной серии достаточно проведение 3-5 полных цик-

лов формования) получаются необходимые зависимости параметров для построения переходных процессов в автоклавной установке и подготовки конкретного рецепта (пример представлен в графическом виде на рис. 2, 3).

В анализируемом переходном физическом процессе, критерий энтальпии (состояния термодинамической системы) является положительным, отсюда следует, что ход данного процесса – эндотермичен из-за влияния температуры, а потом плавно переходит в экзотермиче-

ский. Зависимости на рис. 2 показывают процесс чистой изохоры, давление воздуха всегда почти пропорционально изменению его температуры в начальной фазе. На участке, где давление начинает уменьшаться, мы видим равномерный спад температуры, но когда давление в емкости автоклава равно атмосферному, происходит спад по температуре, относительно начального значения на момент испытаний (продолжительности 3 мин.), затем начинается возврат к температуре внешней среды (рис. 3).

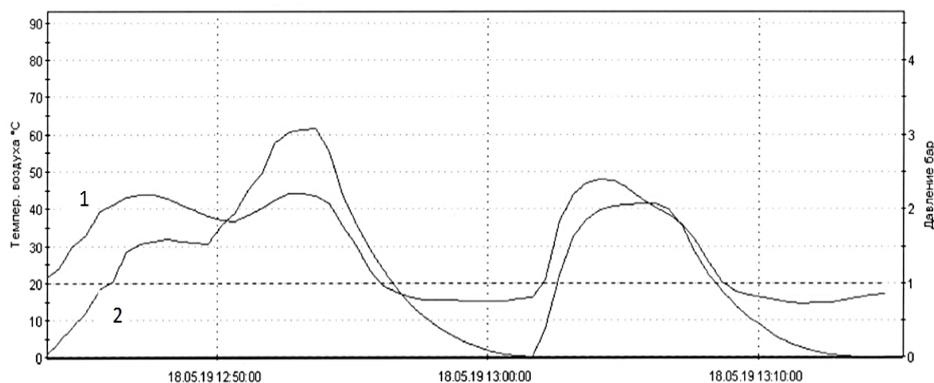


Рис. 2. Результаты натурного испытания при $t = \text{var}$ (1 – температура, 2 - давление)

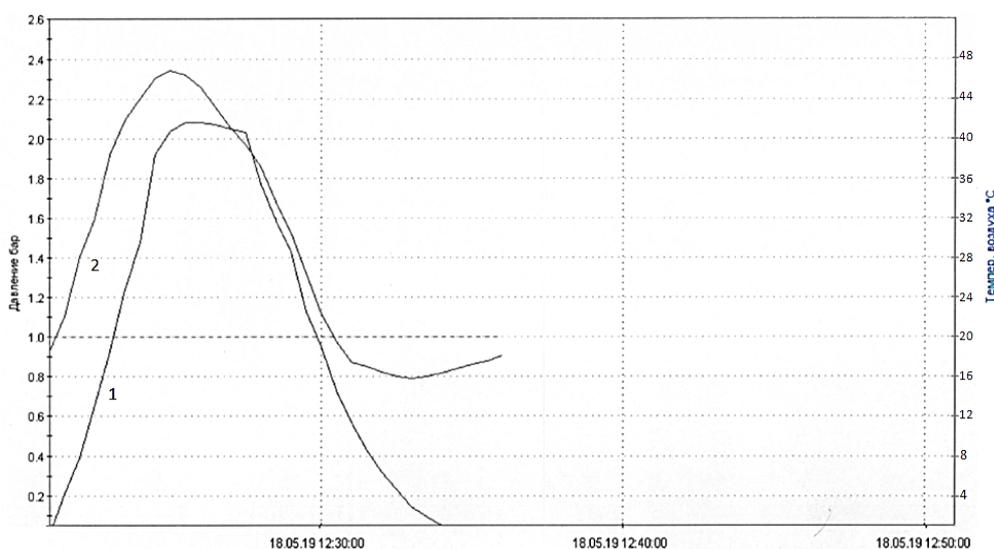


Рис. 3. Результаты натурного испытания при $p = \text{var}$ (1 – давление, 2 - температура)

Поскольку система автоклавной установки не имеет идеальной теплоизоляции, полученная экспериментальная зависимость несколько отличается от теоретической. Это различие вызвано повышенной теплопроводностью сосуда автоклава. Часть тепловой энергии используется для нагрева сосуда, а другая часть – уходит на нагрев воздуха. Таким образом, для точной реализации рецепта каждого изделия системе управления необходимо постоянно отслеживать и коррелировать зависи-

мость изменения давления при повышении или понижении температуры, учитывая экспериментально полученные данные.

На рис. 4 приведены в графическом виде результаты работы автоклавной установки с использованием предложенных решений – методики натурного экспериментирования для мелкосерийного производства ПКМ и модернизированной системы управления системой вентиляции на основе автоматизированного электропривода «ПЧ-АД».

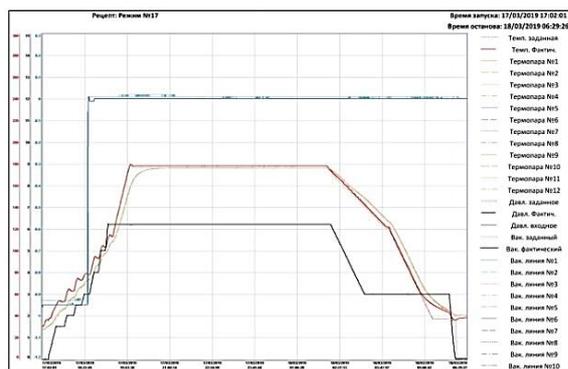


Рис. 4. Графики изменения основных параметров режима формования изделий из ПКМ

Из анализа графиков изменения основных параметров (давление, температура и вакуум во всех контрольных точках автоклава) режима формования изделий из ПКМ можно сделать вывод, что после реализации всех предложенных решений отклонения фактически установленных значений от заданных снизились с 10% до 2% в установившихся режимах, и с 40% до 15% в переходных режимах. А время единичного цикла автоклавирования снизилось на 15-25% (в абсолютных значениях, для приведенного рецепта, на 108-180 минут).

Корректность полученных при этом результатов была подтверждена требуемым качеством полученного полимерно-композитного материала и минимальным процентом брака при реализации опытной серии продукции. Таким образом, можно не прибегая к сложным математическим расчетам и имитационным моделям процессов автоклавирования, получить необходимые корректировки базовых параметров, соответствующие уставки и задания для системы управления производственным процессом автоклавного формирования ПКМ.

Выводы

1. Для мелкосерийного производства ПКМ в автоклавах целесообразно использовать метод натурального экспериментирования, который позволяет выполнить необходимые настройки процесса управления автоклавированием с достаточной точностью, с меньшими затратами ресурсов и времени.

2. Целесообразна реализация частотного регулирования скорости вентилятора автоклава. Такое решение дает возможность не только снизить затраты на производство, но и эффективно скоординировать управление нагревательной и вентиляторной групп установки и тем самым ускорить проведение единичного

цикла автоклавирования ПКМ за счет более быстрого установления требуемого температурного режима.

3. Проведенные в результате активного эксперимента натурные испытания в реальных условиях на автоклавной установке выявили факторы, влияющие на динамику изменения основных параметров процессов автоклавирования, зависящие как от конструктивных особенностей установки, так и от индивидуальных настроек системы автоматического управления основными агрегатами установки (ТЭН, электроприводов вентиляторов, компрессоров и т.д.).

4. С точки зрения минимизации затрат при достижении заданного качества ПКМ при мелкосерийном производстве целесообразно основное внимание уделить корректировке индивидуальных настроек системы автоматического управления основными агрегатами установки автоклавирования, используя данные серий натурных экспериментов.

Литература

1. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
2. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухамето Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С.20–26.
3. Wood J.R., Bader M.G. Void control for polymer-matrix composites (1) theoretical and experimental methods for determining the growth and collapse of gas bubbles // *Compos. Manuf.* 1994. V. 5(3). P. 139–147.
4. Wood J.R., Bader M.G. Void control for polymer-matrix composites (1) theoretical and experimental evaluation of a diffusion model for the growth and collapse of gas bubbles // *Compos. Manuf.* 1994. V. 5 (3). P. 149–158.
5. *Композиционные материалы*; под ред. Д.М. Корнолеса. Киев: Машиностроение, 1985.
6. Крысанов В.Н., Нефедов Ю.В., Романов А.В. Контроль параметров электромагнитной совместимости модернизированного оборудования автоклавной установки // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019. Т. 15. № 2. С. 77-81.
7. Дальский А.М., Барсукова Т.М., Вязов А.Ф. Технология конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 2005.
8. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Свойства полимерных композиционных материалов, изготовленных на основе плетеных преформ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2014. № 3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-2-2.
9. Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Компьютерное моделирование технологического процесса изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 286–291.
10. Koefoed M.S. Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades. Industrial Ph.D. Dissertation. 2003. P. 5–10.
11. *Термодинамика: учеб. пособие*. В 2 ч. Ч. 1.

Поступила 04.06.2020; принята к публикации 21.08.2020

Информация об авторах

Нефедов Юрий Васильевич – аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nefedowjurij@yandex.ru, тел. 8906-673-44-40

USING THE NATURAL EXPERIMENTAL METHOD FOR OPTIMIZATION OF AUTOCLAVE PRODUCTION

Yu.V. Nefedov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the expediency of conducting full-scale experiments in the small-scale production of polymer-composite materials in autoclave installations, which allows you to obtain the necessary values of parameters for controlling the molding process with less time spent, as well as with the least errors. The main attention is paid to taking into account the factors affecting the dynamics of changes in the basic parameters of autoclaving processes, which depend both on the peculiarities of the installation implementation and on the individual settings of the automatic control system of the main units of the installation. To increase the efficiency of the technological process at the hardware level, it was proposed to use a frequency control system for the electric drive of the main fan of a typical autoclave installation. Such a solution makes it possible to reduce power losses, efficiently coordinate the control of the heating and fan groups of the plant, as well as accelerate the single cycle of autoclave of polymer-composite materials. In turn, the implementation of several autoclaving cycles as a full-scale experiment makes it possible to analyze the obtained data and generate the necessary control parameters for the process of forming the polymer-composite material with sufficient accuracy and with less time. It is shown that this minimization of costs when achieving the specified quality of the polymer-composite material in small production conditions is achieved by adjusting the individual settings of the automatic control system of the heating and fan groups of the autoclaving unit

Key words: method of natural experiment, technological process of autoclaving, settings of the automatic control system

References

1. Mikhaylin Yu.A. “Structural polymer composite materials” (“Konstruktsionnye polimernye kompozitsionnye materialy”), St. Petersburg, Nauchnye osnovy I tekhnologii, 2008, 822 p.
2. Dushin M.I., Khrul'kov A.V., Mukhametov R.R. “Choice of technological parameters of the automatic key molding of parts from polymer composite materials”, *Aviation Materials and Technologies (Aviatsionnye materialy i tekhnologii)*, 2011, no. 3, pp. 20–26.
3. Wood J.R., Bader M.G. “Void control for polymer-matrix composites (1) theoretical and experimental methods for determining the growth and collapse of gas bubbles”, *Compos. Manuf.*, 1994, vol. 5 (3), pp. 139–147.
4. Wood J.R., Bader M.G. “Void control for polymer-matrix composites (1) theoretical and experimental evaluation of a diffusion model for the growth and collapse of gas bubbles”, *Compos. Manuf.*, 1994, vol. 5 (3), pp.149-158.
5. Ed. Kornoles D.M. “Composite materials” (“Kompozitsionnye materialy”), Kiev, Mashinostroenie, 1985.
6. Krysanov V.N., Nefedov Yu.V., Romanov A.V. “Monitoring of electromagnetic compatibility parameters of modernized autoclave equipment”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 77-81.
7. Dal'skiy A.M., Barsukova T.M., Vyazov A.F. “Technology of construction materials” (“Tekhnologiya konstruktsionnykh materialov”), Moscow, Mashinostroenie, 2005.
8. Donetskii K.I., Kogan D.I., Khrul'kov A.V. “Properties of polymer composite materials made on the basis of woven preforms”, *Papers of VIAM: Electron. Sci. and Tech. J. (Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhn. zhurn)*, 2014, no3. art. 05, available at: <http://www.viam-works.ru> (access date: 01/14/2016), DOI: 10.18577 / 2307-6046-2014-0-3-2-2.
9. Raskutin A.E., Goncharov V.A. “Computer simulation of the manufacturing process of PCM by vacuum infusion”, *Aviation Materials and Technologies (Aviatsionnye materialy i tekhnologii)*, 2012, no. 5, pp. 286–291.
10. Koefoed M.S. “Modeling and simulation of the VARTM process for wind turbine blades”, industrial Ph.D. dissertation, 2003, pp. 5–10.
11. Burdakov V.P., Dzyubenko B.V., Mesnyankin S.Yu., Mikhaylova T.V. “Thermodynamics” (“Termodinamika: ucheb. posobie. V 2 ch. Ch. 1. Osnovnoy kurs”), textbook, 2009, Moscow, Drofa, 479 p.
12. Belokon' N. I. “Thermodynamics” (“Termodinamika”), Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat, 1954, 416 p.

Submitted 04.06.2020; revised 21.08.2020

Information about the author

Yuriy V. Nefedov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nefedowjurij@yandex.ru, tel. +7906-673-44-40