

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Синтез системы управления процессом дегидрирования этилбензола на основе метода прогнозирующего функционального управления С.Л. Подвальный, А.П. Попов, С.Г. Тихомиров, О.Г. Неизвестный.....	7
Сравнительный анализ популярных платформ для систем управления обучением С.А. Коваленко, А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова, В.А. Малиновкин.....	15
Динамическая задача о назначении единичного задания с временными ограничениями С.А. Олейникова, Е.С. Менкова.....	19
Обнаружение сигналов светофоров с использованием цветовой сегментации и детектора радиальной симметрии Р.М. Шакирзянов.....	25
Алгоритм построения дерева достижимости для стохастических сетей Петри Д.С. Звягин.....	34
Синтез системы управления процессом деструкции сшитых полимеров при комбинированных внешних воздействиях С.Л. Подвальный, А.П. Попов, А.В. Карманов, Г.С. Тихомиров, Н.К. Образцов.....	41

Радиотехника и связь

Антенная система на основе плоской линзы Люнеберга со сквозными круглыми отверстиями и осесимметричного ТЕМ-рупора А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Ф.С. Сафонов.....	49
Зависимость характеристик антенны Вивальди от используемой металлизации подложки С.М. Фёдоров, А.С. Бадаев, Е.А. Ищенко, Е.В. Папина, К.А. Бердников, С.И. Деревянкин.....	56
Разработка методики проектирования цифровых автоматов с памятью на ПЛИС А.А. Пирогов, Ю.А. Пирогова, С.А. Гвозденко, Д.В. Шардаков, Э.В. Сёмка.....	61
Математическая модель излучающей апертуры ФАР, состоящей из сегменто-параболических антенн Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, К.С. Сафонов.....	69
Стохастическое декодирование линейных блочных кодов с помощью проверочных матриц А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова, О.В. Свиридова.....	79
Исследование влияния изгиба RFID метки на основные характеристики С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, Е.В. Папина, К.А. Бердников, Ю.Д. Савкина.....	85
Разработка реконфигурируемых устройств на основе программируемых логических интегральных схем А.А. Пирогов, Ю.А. Пирогова, С.А. Гвозденко, Д.В. Шардаков, Б.И. Жилин.....	90
Методика сбора и оценки диагностических сигналов при анализе воздействия ЭМП на электронные средства М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, А.Л. Неклюдов, С.Н. Рожненко, К.Ч. Колбая.....	98

Математическая модель модифицированной линзы Ротмана, выполненной на основе несимметричной полосковой линии

Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, Ф.С. Сафонов..... 102

Развязка антенн Вивальди в составе ММО антенной решетки

**С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, И.А. Зеленин, Е.В. Папина, Е.Д. Меньшикова,
С.И. Деревянкин..... 108**

Машиностроение и машиноведение

Применение статистического подхода к анализу рисков, возникающих при эксплуатации лифтового оборудования

Ю.Н. Скорская, П.В. Витчук, В.Ю. Анцев, Н.Н. Трушин..... 112

Влияние физико-химического состояния контактных поверхностей на развитие процесса диффузионной сварки титана

А.Б. Булков, В.В. Пешков, И.Б. Корчагин, Г.В. Селиванов..... 116

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Control system synthesis for the ethylbenzene dehydrogenation process based on the predictive functional control method S.L. Podvalny, A.P. Popov, S.G. Tikhomirov, O.G. Neizvestny.....	7
Comparative analysis of popular platforms for learning management systems S.A. Kovalenko, A.V. Barabanov, N.I. Grebennikova, V.A. Malinovkin.....	15
Dynamic problem on assigning a single task with time limits S.A. Oleynikova, E.S. Menkova.....	19
Detection of traffic signals using color segmentation and a radial symmetry detector R.M. Shakirzyanov.....	25
Algorithm for constructing a reachability tree for stochastic Petri nets D.S. Zvyagin.....	34
Synthesis of a control system for the destruction process of cross-linked polymers under combined external actions S.L. Podvalny, A.P. Popov, A.V. Karmanov, G.S. Tikhomirov, N.K. Obratsov.....	41

Radio engineering and communication

Antenna system based on a flat Luneberg lens with through round holes and an axisymmetric tem-horn A.V. Ashikhmin, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendurin, F.S. Safonov.....	49
Dependence of Vivaldi antenna characteristics on the substrate metallization S.M. Fyedorov, A.S. Badaev, E.A. Ishchenko, E.V. Papina, K.A. Berdnikov, S.I. Derevyankin.....	56
Development of a procedure for designing digital automates with memory on FPGA A.A. Pirogov, Yu.A. Pirogova, S.A. Gvozdenko, D.V. Shardakov, E.V. Syemka.....	61
Mathematical model of the radiating aperture of headlights consisting of segment-parabolic antennas Yu.G. Pasternak, V.A. Pandyurin, K.S. Safonov.....	69
Stochastic decoding of linear block codes using check matrix A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, M.V. Khoroshaylova, O.V. Sviridova.....	79
Study of the influence of RFID tag bending on basic characteristics S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, E.V. Papina, K.A. Berdnikov, Yu.D. Savkina.....	85
Development of reconfigurable devices based on programmable logic integrated circuits A.A. Pirogov, Yu.A. Pirogova, S.A. Gvozdenko, D.V. Shardakov, B.I. Zhilin.....	90
Methods for collecting and evaluation of diagnostic signals in analysis of EMF impact on electronic devices M.A. Romashchenko, D.V. Vasilchenko, A.L. Neklyudov, S.N. Rozhnenko, K.Ch. Kolbaia..	98
Mathematical model of a modified Rotman lens based on an asymmetric stripe line Yu.G. Pasternak, V.A. Pandyurin, F.S. Safonov.....	102

Interconnection of Vivaldi antennas in the MIMO antenna array

S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, I.A. Zelenin, E.V. Papina, E.D. Men'shikova, S.I. Derevyankin..... 108

Mechanical engineering and science of machines

Application of a statistical approach to the analysis of risks of lift equipment operation

Yu.N. Skorskaay, P.V. Vitchuk, V.Yu. Antsev, N.N. Trushin..... 112

Influence of the physico-chemical state of contact surfaces on the development of the process of diffusion welding of titanium

A.B. Bulkov, V.V. Peshkov, I.B. Korchagin, G.V. Selivanov..... 116

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2020.16.6.001

УДК 519.876.5

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДЕГИДРИРОВАНИЯ ЭТИЛБЕНЗОЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

С.Л. Подвальный¹, А.П. Попов², С.Г. Тихомиров², О.Г. Неизвестный¹

¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

²**Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: описывается применение метода предиктивного управления при синтезе автоматизированной системы программного управления производством стирола. На основе результатов системного анализа объекта управления обоснован способ управления технологическим процессом, проведены обзор и оценка возможности использования различных видов регулирующих устройств. В рамках концепции модельно-ориентированного проектирования синтезирована автоматизированная система, реализующая предсказательное функциональное управление (Predictive functional control (PFC)) концентрацией стирола на выходе из первой ступени реакторного блока. Выполнен структурный синтез и разработан алгоритм функционирования управляющей системы. В качестве структурного элемента, выполняющего построение прогнозной траектории изменения управляющего и управляемого параметров, использован комплекс динамических моделей, описывающих теплообменные процессы и физико-химические превращения, протекающие в исследуемой системе. Расчет оптимального значения управляющего воздействия производился с учетом инерционности технологического оборудования, параметров состояния каталитического слоя реактора, энергетических потоков и компонентов реакционной среды в соответствии со сформированным комплексным интегральным критерием энергоэффективности процесса при одновременном обеспечении максимальной производительности. Приведен сравнительный анализ результатов расчета переходных процессов по основному каналу системы управления, полученных при использовании регулятора ПИД-структуры и управляющего устройства, реализующего метод PFC-управления

Ключевые слова: прогнозирующее функциональное управление, функциональная структура, алгоритм управления, горизонт прогнозирования, дегидрирование этилбензола

Введение

В настоящее время во все сферы человеческой деятельности происходит активное внедрение технологий четвертой промышленной революции (так называемая индустрия 4.0). В производственной сфере наиболее значимой компонентой индустрии 4.0 является технология создания цифровых двойников промышленного оборудования и протекающих в нем физико-химических процессов. Благодаря этому открываются новые возможности по управлению технологическими процессами и повышению их эффективности.

Это особенно актуально для таких отраслей, как нефтегазодобыча, переработка углеводородов, а также для предприятий химической промышленности. Здесь сконцентрировано большое количество крупнотоннажных производств, для которых особенно остро стоит проблема управляемого химического синтеза и обеспечения при этом максимально возможной эффективности эксплуатации технологических

линий. То есть необходимо решить комплексную задачу: произвести максимальный объем продукции с заданными показателями качества при минимально возможных расходах энергоресурсов и реагентов, при исключении возможности возникновения аварийных ситуаций, а также преждевременного износа оборудования.

Одним из таких крупнотоннажных химических производств является получение стирола, осуществляемое путем двухстадийного дегидрирования этилбензола в каталитическом реакторе непрерывного действия. В России мощность промышленных установок по стиrolу составляет от 70 000 до 200 000 тонн стирола в год. При этом одним из главных недостатков действующих автоматизированных систем управления (АСУ) данным технологическим процессом является то, что регулирование содержания целевого продукта в реакционной смеси производится в режиме «постфактум» (т.е. после того, как с помощью средств контрольно-измерительной аппаратуры выявлено изменение содержания стирола в контактной газе на выходе из реактора). Это приводит к снижению энергоэффективности процесса и производительности.

До настоящего времени существовало две фундаментальных проблемы, которые являлись препятствиями на пути к решению задачи по устранению данного производственного недостатка:

- отсутствие возможности достоверного прогноза динамики изменения параметров состояния каталитического слоя реактора (степень закоксованности, активность, селективность) и реакционной смеси в пространственно-временной области;

- математическое и алгоритмическое обеспечение созданных систем управления реакторами дегидрирования этилбензола априори не позволяло обеспечить точность расчета и своевременность выработки управляющих воздействий для изменения параметров процесса [1].

Повышение точности моделей дегидрирования, синтез математического описания для оперативной оценки падения активности катализатора в зависимости от скорости протекания микрокаталитических процессов хемосорбции, десорбции и химического взаимодействия реагентов позволяет существенно приблизить результаты моделирования к реальным траекториям изменения параметров состояния реального процесса [2, 3]. Это позволяет не только решить первую фундаментальную проблему, но и открывает возможности для использования технологии создания цифровых двойников на основе разработанного комплекса имитационных моделей [4]. Что, в свою очередь, предоставляет возможность модернизации АСУ посредством использования новых методов и алгоритмов управления применительно к рассматриваемому технологическому процессу.

Постановка задачи синтеза системы управления

В статье [5] отображены результаты системного анализа процесса дегидрирования этилбензола как объекта управления, выбран способ управления температурным режимом протекания химических превращений, сформулированы общая и частная задачи синтеза управляющей системы.

Цель управления заключается в своевременной компенсации падения активности катализатора и величины процентного содержания стирола в контактном газе ниже заданной границы путем оперативного изменения величины давления топливного газа, поступающего для обогрева водяного пара.

Согласно анализу особенностей протекания процесса дегидрирования следует, что объект управления относится к третьему классу сложных динамических систем, изменение параметров состояния которого может быть достоверно описано и предсказано только на ограниченном промежутке времени. Таким образом, для улучшения показателей энергоэффективности производства необходимо усовершенствовать систему управления с целью повышения качества оперативного управления процессом, а также обеспечить возможность реализации упреждающего (предиктивного) управления.

Структурный синтез системы управления

В настоящее время существуют различные методы, на основе которых осуществляется синтез предиктивных систем управления [6-10]. Для такого класса непрерывных, многостадийных и нестационарных процессов, как дегидрирование этилбензола, скорость протекания которых очень велика (для дегидрирования от момента входа шихты в реакционную зону до выхода из ректора в зависимости от скорости реакционного потока время химических превращений составляет от 10 до 30 секунд), наиболее целесообразно использовать метод предсказательного функционального управления (Predictive functional control (PFC)) [6].

Для выбора концепции синтеза предиктивной АСУ выполнен анализ алгоритмических и математических обеспечений управляющих систем, в результате которого сделано заключение, что наиболее целесообразно использовать концепцию включения математических моделей в контуры управлений как структурных элементов автоматизированной системы. При этом может быть использована как полная нелинейная модель, построенная по модульному принципу [10] для оптимизации стационарных режимов, так и линеаризованная модификация модели с необходимостью ее постоянной периодической идентификации в условиях динамической стабилизации [11].

Решение поставленной задачи не может быть обеспечено путем реализации систем управления на базе классического ПИД- или LQR-регуляторов, так как для данных устройств необходимо наличие неизменяющегося горизонта прогноза регулируемой величины. Использование адаптивного регулятора с эталонной моделью в виде структурного элемента предиктора Смитта также не позволяет

достичь требуемых результатов в связи с тем, что настраиваемые параметры регулирующего устройства изменяются только после определения ошибки управления [12].

Количество возмущающих факторов, оказывающих существенное воздействие на динамику рассматриваемого технологического процесса, очень велико, и каждое из них способно за малый промежуток времени (10-20 секунд) вызвать падение концентрации целевого продукта на выходе. Поэтому регуляторы с внутренней моделью, описанные в [13], не в состоянии обеспечить своевременную выработку

компенсирующего воздействия для нивелирования последствий возникновения внешних возмущающих сигналов.

Таким образом, синтез предиктивной АСУ процессом дегидрирования осуществлен путем совмещения принципов обратной связи и программного управления с упреждением в рамках концепции модельно-ориентированного проектирования. Концептуальная модель, являющаяся основой для технической реализации программного предсказательного функционального управления дегидрированием этилбензола, выглядит следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Концептуальная модель системы управления

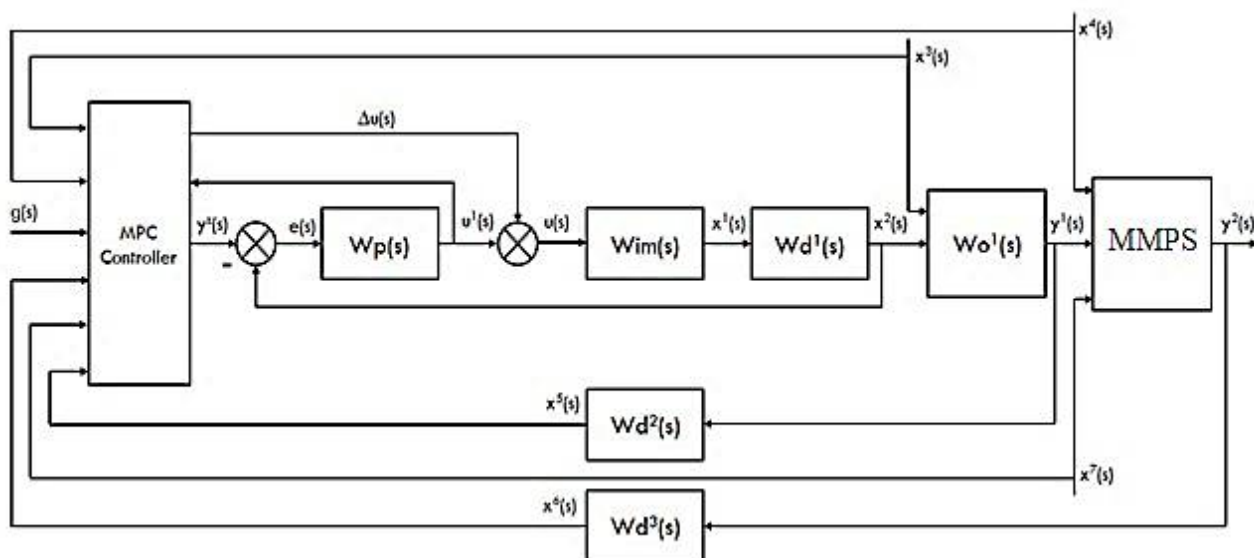


Рис. 2. Структурная схема предиктивной системы программного управления температурой пара на выходе из второй ступени пароперегревательной печи с коррекцией по процентному содержанию стирола на выходе из первой ступени реакторного блока

На рис. 1 и 2 $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора расхода топливного газа; $W_{im}(s)$ – передаточная функция исполнительного механизма на линии подачи газа в ступень пароперегревательной печи; $W_o^1(s)$ – передаточная функция второй ступени пароперегревательной печи; ММРС – математическая модель объекта управления; $W_d^1(s)$ – передаточная функция датчика расхода на линии подачи топливного газа в пароперегревательную печь; $W_d^2(s)$ – передаточная функция датчика температуры водяного пара на входе в первую ступень реакторного блока; $W_d^3(s)$ – передаточная функция хроматографа, осуществляющего измерение количества выделившегося стирола; МРС-controller – модуль предиктивного расчета величины задающего воздействия для регулятора расхода газа $y^z(s)$; $g(s)$ – задающее воздействие по нижней границе процентного содержания стирола на выходе из первой ступени реактора, подаваемое на вход МРС-controller; $y^1(s)$, $y^2(s)$ – управляемые величины: температура водяного пара на выходе из печи и концентрация стирола в контактном газе; $e(s)$ – отклонение величины расхода топливного газа от задающего воздействия $y^z(s)$; $u^1(s)$ – управляющее воздействие, поступающее с выхода регулятора расхода газа; $u(s)$ – управляющее воздействие, поступающее с исполнительного механизма линии расхода газа; $\Delta u(s)$ – величина коррекции управляющего воздействия; $x_1(s) \div x_7(s)$ – выходные сигналы исполнительного механизма, датчиков расходов газа, водяного пара, этилбензольной шихты, датчиков температуры водяного пара на входе в реакторную ступень, количества выделившегося стирола и температуры водяного пара, поступающего на вход пароперегревательной печи соответственно.

Таким образом, технология создания цифровых двойников является наиболее эффективным инструментом трансформации действующей АСУ в интеллектуальные упреждающие системы управления, так как их использование позволяет создать эквивалент реальному технологическому процессу в виде программно-аппаратного комплекса, функционирующего на основе имитационных моделей, модулей оптимизации, систем поддержки принятия решений и подсистемы машинного обучения.

Программно-аппаратный модуль цифрового двойника процесса интегрирован в структуру системы управления как функциональный элемент (МРС-controller). Структура управляющей системы в виде совокупности функцио-

нальных элементов и информационных связей между ними представлена на рис. 2.

Описание алгоритма функционирования системы управления

Анализ набора функциональных элементов и принципа их взаимодействия позволил сделать заключение, что синтезированная система является разновидностью каскадных систем управления. Выходной сигнал модуля МРС является входным задающим воздействием для внутреннего контура регулирования расходом топливного газа с коррекцией по значениям температуры водяного пара и концентрации стирола. Алгоритм расчета и подачи управляющих воздействий при реализации метода программного управления сводится к выполнению следующей последовательности операций:

1. С использованием комплекса математических моделей, описывающих динамику процесса нагрева пара в пароперегревательной печи, теплообменных и химических процессов внутри реакционной зоны [2-3], процесса дезактивации каталитического слоя [4], в модуле МРС осуществляется расчет горизонта изменения величины управляющего воздействия (расход топливного газа) и прогнозного горизонта изменения величины концентрации стирола.

2. При стремлении концентрации стирола к нижнему пределу заданного диапазона изменения данного параметра, с учетом инерционности исполнительных механизмов и пароперегревательной печи производится программное изменение величины задающего воздействия для регулятора расхода газа в соответствии с рассчитанной траекторией горизонта управления.

3. Величина коррекции управляющего воздействия Δu поступает из модуля МРС на исполнительный механизм расхода топливного газа для нивелирования последствий инерционности основного канала управления.

4. При возникновении внешних возмущений, по измеренным величинам температуры пара на выходе из пароперегревательной печи концентрации стирола и расходов технологических сред в МРС-модуле выполняется перерасчет горизонта изменения управляющего воздействия и прогнозного горизонта управляемого параметра.

Результаты имитационного моделирования систем управления

Оценка эффективности предложенного алгоритма управления осуществлена посредством цифрового имитирования и сравнения результатов работы АСУ, функционирующей на базе модуля MPC и АСУ, реализующей метод управления по отклонению на базе регулятора ПИД-структуры.

Получены траектории концентрации целевого продукта на выходе реакционного аппарата при изменении величины управляющего воздействия, вызванного достижением концентрации стирола нижнего заданного предела в 34 масс.%. Для проведения экспериментов по эмуляции работы автоматизированных систем приняты следующие допущения и условия функционирования объекта управления:

- на реактор не действуют внешние возмущающие воздействия;
- расчет управляющего воздействия в каждой из рассматриваемых систем осуществляет-

ся с учетом динамики падения активности каталитического слоя реактора;

- изменение активности катализатора происходит без учета реакций регенерации поверхности перегретым водяным паром;

- временной интервал задержки поступления сигнала с хроматографа составляет 6 минут;

- расчет управляющих воздействий в АСУ производился на основе динамической модели процесса [2-4] с учетом текущего значения активности каталитического слоя реактора.

Программный комплекс имитационных испытаний систем управления реализован с использованием интегрированной среды Matlab (рис. 3) [4]. Результаты вычислительных экспериментов в виде совмещенных графиков переходных процессов концентрации стирола и давления топливного газа, вызванные изменением его расхода через проходное сечение исполнительного механизма, представлены на рис. 4-5.

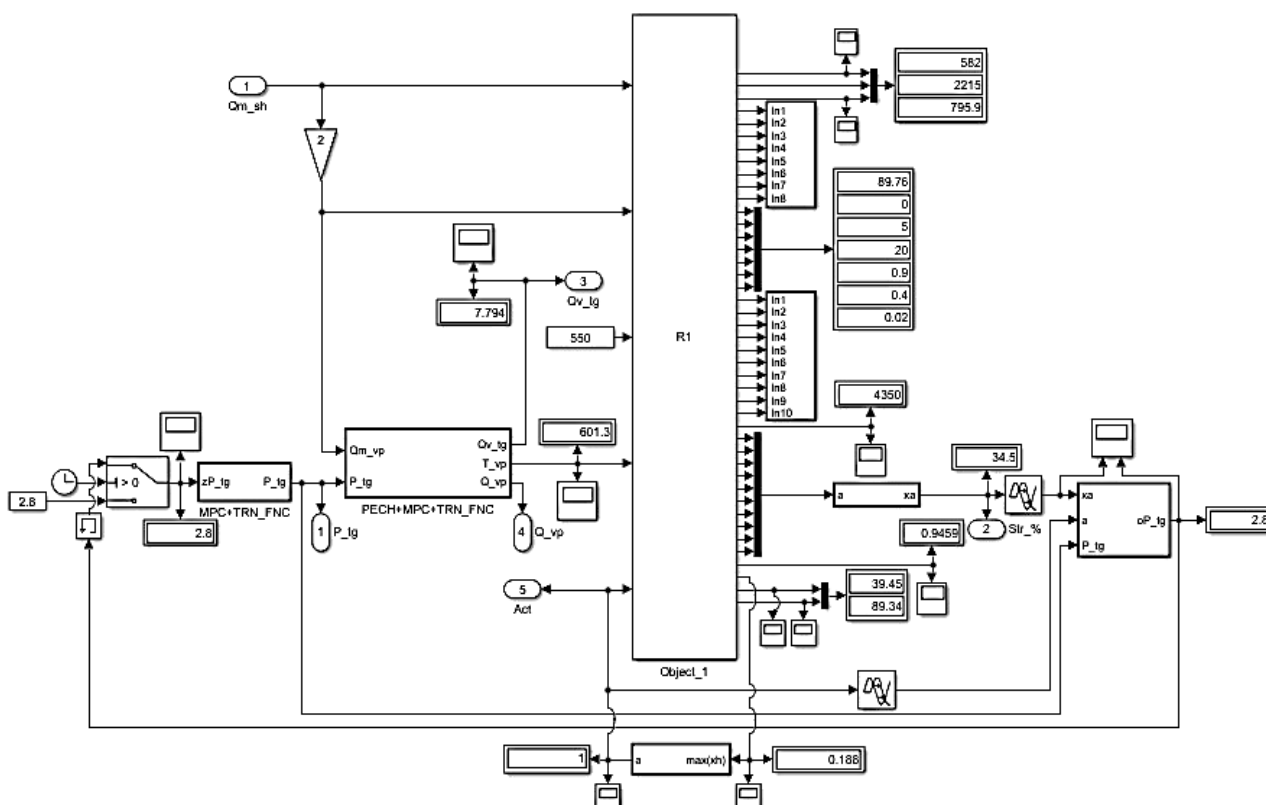


Рис. 3. Программный интерфейс эмуляции: протекания физико-химических процессов в технологическом оборудовании, построения горизонта прогноза по величинам управляемого и управляющего воздействия, работы автоматизированных систем управления

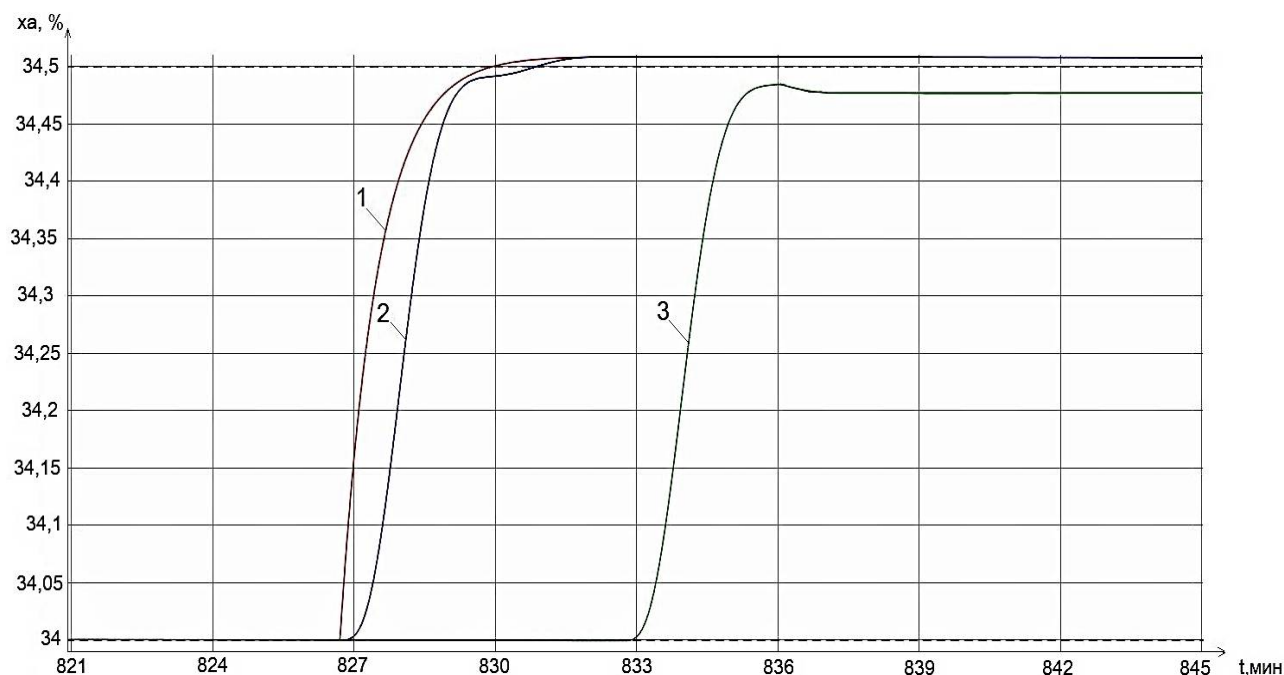


Рис. 4. Совмещённые графики изменения концентрации целевого продукта на выходе из первой ступени реакторного блока, полученные в результате подачи управляющего воздействия, компенсирующего снижение активности каталитического слоя:

- 1- горизонт изменения концентрации стирола, рассчитанный в результате применения метода программного PFC-управления с использованием модуля предиктивного управления (MPC);
 - 2- график изменения концентрации стирола, полученный в результате применения метода программного PFC-управления;
 - 3- график изменения концентрации стирола, полученный в результате применения принципа управления по отклонению регулируемой величины;
- х_а – концентрация стирола, масс. %.

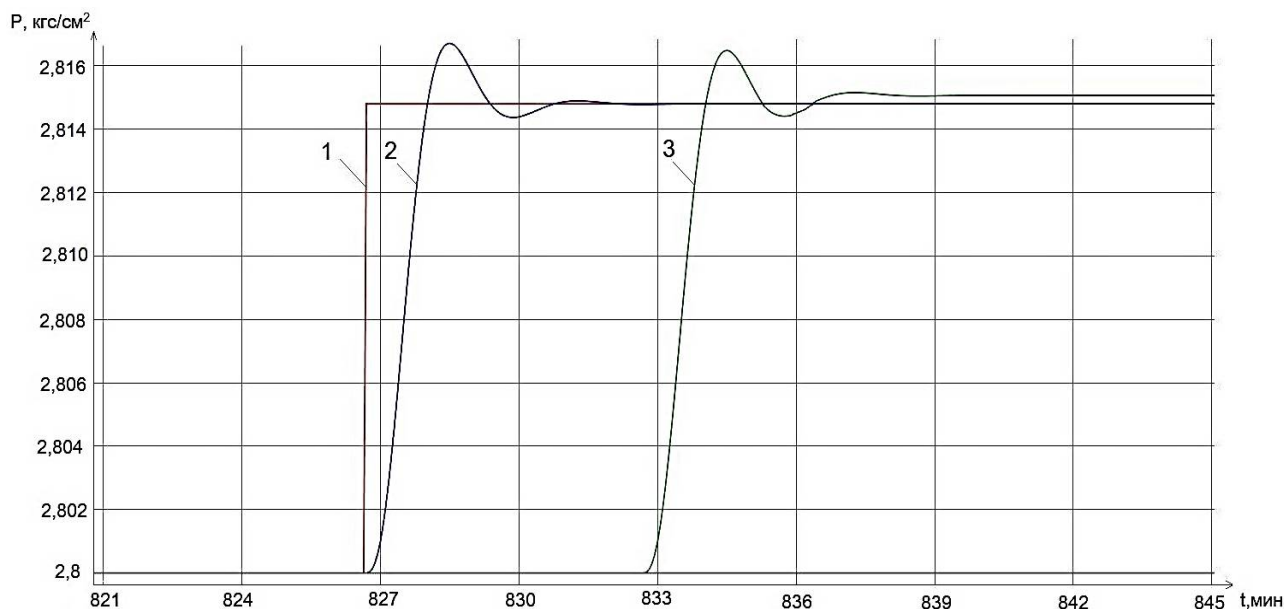


Рис. 5. Совмещённые графики изменения давления топливного газа (P), поступающего на вход пароперегревательной печи:

- 1- горизонт изменения величины расхода топливного газа, полученный в результате применения метода программного PFC-управления;
- 2- график переходного процесса системы управления, реализующей метод PFC-управления с использованием MPC-регулятора в контуре управления расходом топливного газа;
- 3- график изменения концентрации стирола, полученный в результате применения принципа управления «по отклонению» регулируемой величины с использованием ПИД-регулятора в контуре управления расходом топливного газа

Заключение

Анализ результатов имитационного моделирования разработанной АСУ позволил сделать вывод о том, что ее использование обеспечивает оперативный расчет управляющего воздействия и своевременную компенсацию снижения активности каталитического слоя реактора. Это предотвращает падение выхода целевого продукта ниже заданного значения, что в перспективе позволит увеличить энергоэффективность и производительность реакторной установки и уменьшить влияние человеческого фактора на процесс управления технологическим процессом.

Литература

1. Хаустов И.А. Управление синтезом полимеров периодическим способом на основе дробной подачи компонентов реакции // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20. №4. С.787-792.
2. Разработка математической модели кинетики процесса дегидрирования этилбензола в двухступенчатом адиабатическом реакторе непрерывного действия / В.К. Битюков, И.А. Жатова, М.В. Алексеев, А.П. Попов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 2 (64). С. 55-60.
3. Исследование изменения состава этилбензолной шихты в реакторе производства стирола с учетом парциальных давлений реагентов / С.Л. Подвальный, А.П. Попов, С.Г. Тихомиров, О.В. Карманова, О.Г. Неизвестный, Е.Н. Ковалева // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54. № 6. С. 775-783.
4. Software implementation of the dynamic model of the first stage of the reactor unit for styrene production in the Matlab/Simulink environment / S.L. Podvalny, O.G. Neizvestny, A.P. Popov, S.G. Tikhomirov // Journal of Physics: Conference Series. 2019. P. 012072.
5. Системный анализ реактора дегидрирования как объекта управления / А.П. Попов, В.К. Битюков, С.Г. Тихомиров, О.Г. Неизвестный, Е.Д. Чертов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 2(76). С. 77-85.
6. Holkar K.S., Waghmare L.M. An Overview of Model Predictive Control // International Journal of Control and Automation. December, 2010. Vol. 3. №4. P.47-64.
7. К выбору типа регулятора для решения задачи управления электромагнитным приводом / Д.В. Шайхутдинов, В.И. Дубров, Р.И. Леухин, Н.Д. Наракидзе, Д.А. Щучкин, С.Г. Январев // Фундаментальные исследования. 2015. № 10 С.107-116.
8. Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control. Springer // 2nd edition. 2007. pp. 405.
9. Вент Д.П., Лопатин А.Г., Брыков Б.А. Сравнительный анализ различных методов управления химическим реактором синтеза полимеров // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. 2019. Т. 21. С. 55-67.
10. Подвальный С.Л., Барабанов А.В. Модульная структура системы многоальтернативного моделирования процессов полимеризации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 5.1. С. 41-43.
11. Использование динамических предиктивных моделей для управления техническими системами с инертностью / Л.А. Мыльников, Н.А. Гегель, А.В. Кычкин, Б. Краузе // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. №26. С. 77-91.
12. Шариков Ю.В., Шариков Ф.Ю. Системы управления с использованием математических моделей технологических объектов в контуре управления. Автоматизация технологических процессов // MathDesigner. 2016. № 1. С. 4-8.
13. Бураков М.В., Коновалов А.С. Модификация предиктора Смита для линейного объекта с переменными параметрами. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2017. № 4. С. 25-34.
14. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // В записную книжку инженера. 2007. С.90-98.

Поступила 30.10.2020; принята к публикации 18.12.2020

Информация об авторах

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru
Попов Алексей Петрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19), e-mail: aleksej_p_91@mail.ru
Тихомиров Сергей Германович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19), e-mail: tikhomirov_57@mail.ru
Неизвестный Олег Геннадьевич - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: o.neizvestnyi@mail.ru

CONTROL SYSTEM SYNTHESIS FOR THE ETHYLBENZENE DEHYDROGENATION PROCESS BASED ON THE PREDICTIVE FUNCTIONAL CONTROL METHOD

S.L. Podvalny¹, A.P. Popov², S.G. Tikhomirov², O.G. Neizvestny¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh State University of Engineering Technology, Voronezh, Russia

Abstract: the article describes the application of the predictive control method in the synthesis of an automated system for software control of styrene production. Based on the results of the object system analysis, the method of process control is justified, the review and evaluation of the possibility of using various types of control devices is carried out. Within the framework of the model-oriented design concept, an automated system is synthesized that implements predictive functional control (PFC) of the concentration of styrene at the outlet of the reactor unit first stage. A structural synthesis was performed, and the control system operation algorithm was developed. A set of dynamic models describing heat exchange processes and physical and chemical transformations occurring in the system under study is used as a structural element that performs the construction of a predictive trajectory of changes in the controlling and controlled parameters. The calculation of the optimal value of the control action was carried out taking into account the inertia of the process equipment, the parameters of the state of the catalytic layer of the reactor, energy flows and components of the reaction medium in accordance with the formed complex integral criterion of the energy efficiency of the process while ensuring maximum productivity. A comparative analysis of the results of calculating transient processes for the main channel of the control system, obtained using a PID structure controller and a control device that implements the PFC control method

Key words: predictive functional control, functional structure, control algorithm, prediction horizon, ethylbenzene dehydrogenation

References

1. Khaustov I.A. "Control of polymer synthesis by a periodic method based on fractional feed of reaction components", *Bulletin of Tambov State Technical University (Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 787-792.
2. Bityukov V.K., Zhatova I.A., Alekseev M.V., Popov A.P. "Development of a mathematical model of the kinetics of the ethylbenzene dehydrogenation process in a two-stage adiabatic continuous reactor", *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy)*, 2015, no. 2(64), pp. 55-60.
3. Podvalny S.L., Popov A.P., Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Neizvestnyy O.G., Kovaleva E.N. "Investigation of changes in the composition of the ethylbenzene charge in the styrene production reactor taking into account the partial pressures of the reagents", *Theoretical Foundations of Chemical Technology (Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii)*, 2020, vol. 54, no. 6, pp. 775-783.
4. Podvalny S.L., Neizvestnyy O.G., Popov A.P., Tikhomirov S.G. "Software implementation of the dynamic model of the first stage of the reactor unit for styrene production in the Matlab/Simulink environment", *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, pp. 012072.
5. Popov A.P., Bityukov V.K., Tikhomirov S.G., Neizvestnyy O.G., Chertov E.D. "System analysis of the dehydrogenation reactor as a control object", *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy)*, 2018, vol. 80, no. 2(76), pp. 77-85.
6. Holkar K.S., Waghmare L.M. "An overview of model predictive control", *International Journal of Control and Automation*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 47-64.
7. Shaikhutdinov D.V., Dubrov V.I., Leukhin R.I., Narakidze N.D., Shchuchkin D.A., Yanvarev S.G. "On the choice the type of regulator for solving the problem of controlling an electromagnetic drive", *Fundamental Research (Fundamental'nye issledovaniya)*, 2015, no. 10, pp. 107-116.
8. Camacho E.F., Bordons C. "Model predictive control", Springer, 2007, 405 p.
9. Vent D.P., Lopatin A.G., Brykov B.A. "Comparative analysis of various methods of controlling a chemical reactor for polymer synthesis", *Bulletin of International Academy of System Research (Vestnik Mezhdunarodnoy akademii sistemnykh issledovaniy)*, 2019, vol. 21, pp. 55-67.
10. Podvalny S.L., Barabanov A.V. "Modular structure system of multi-alternative polymerization process modeling", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 5-1, pp. 41-43.
11. Myl'nikov L.A., Gergel N.A., Kychkin A.V., Krause B. "Using dynamic predictive models for managing technical systems with inertia", *Bulletin of PNRPU. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems (Vestnik PNIPU. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya)*, 2018, no. 26, pp. 77-91.
12. Sharikov Yu.V., Sharikov F.Yu. "Control systems using mathematical models of technological objects in the control loop. Automation of technological processes", *MathDesigner*, 2016, no. 1, pp. 4-8.
13. Burakov M.V., Konovalov A.S. "Modification of the Smith predictor for a linear object with variable parameters", *Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg*, 2017, no. 4, pp. 25-34.
14. Denisenko V. "PID controllers: principles of construction and modification", *To the engineer's notebook (V zapisnuyu knizhku inzhenera)*, 2007, pp. 90-98.

Submitted 30.10.2020; revised 18.12.2020

Information about the authors

Semen L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru
Aleksey P. Popov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolyutsii prospekt, Voronezh 394036, Russia), e-mail: aleksej_p_91@mail.ru
Sergey G. Tikhomirov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolyutsii prospekt, Voronezh 394036, Russia), e-mail: tikhomirov_57@mail.ru
Oleg G. Neizvestny, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: o.neizvestnyi@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОПУЛЯРНЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ

С.А. Коваленко, А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова, В.А. Малиновкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в настоящий момент система онлайн-образования принимает новые масштабы. Потребность в платформе, в которой будет гармонично сочетаться современный функционал и простота пользования, всё больше и больше увеличивается. Использование новейших технических разработок позволяет создавать электронные платформы для организации качественного онлайн-обучения. Представлен обзор платформ, а именно: «Moodle», «iSpring Learn» и «Google Classroom». Рассматриваемые сервисы имеют большую целевую аудиторию и высокий спрос в сфере онлайн-образования. С помощью них можно осуществлять как очное, так и заочное обучение, хранение информации курса, тестов и лекций, а также производить контроль за прохождением обучения и вести отчётность. Были рассмотрены преимущества и недостатки каждого сервиса. Сравнение платформ производится по ряду характеристик, а именно: удобство интерфейса, мобильность системы (развертывание системы без привлечения специалистов), наличие встроенного редактора курса, наличие видеоконференции, доступность основного функционала, наличие дополнительного функционала, поддержка различного рода файловых расширений, гибкость системы, наличие мобильных приложений, денежные затраты при использовании платформы. Эти аспекты выступают основными при выборе платформы, так как они являются ключевыми при использовании сервисов онлайн-обучения

Ключевые слова: хранение информации, управление процессом обучения, платформа для организации качественного образования онлайн

Введение

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

Обзор функциональных возможностей платформы «Moodle»

Одна из популярных платформ, которая берётся за решение данных проблем, является «Moodle». «Moodle» это веб-приложение, позволяющее создавать систему обучения с кастомизированным управлением [2]. Эта платформа предназначена для решения задач корпоративного обучения, учебных центров и образовательных учреждений. Но для работы необходимо обслуживание и настройка, а именно: установка на хостинг, настройка системы и обновления ее и т.д.

Рассмотрим функциональные возможности приложения, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Функциональные возможности «Moodle»

Наличие мобильного приложения	Обучение возможно через мобильное приложение и в офлайн - режиме
Работа с форматами	Поддержка всех форматов. По умолчанию поддерживаются такие форматы, как SCORM, AICC, IMS. Чтобы использовать xAPI, необходимо использовать плагин (Logstore API)
Система обратной связи	Конфигурация, чатов, форумов, системы оповещения
Работа с различными форматами файлов	Возможность загрузки любого типа файлов: изображения, текстовые файлы, тесты и курсы. Презентации можно загрузить при использовании плагина Presentation. Есть возможность загрузки видео с сервисом Medial
Разнообразие в обучении	Использование элементов геймификации
Работа с другими сервисами	Чтобы подключить CRM или WordPress системы, рекомендуется воспользоваться плагинами Arlo или Edwiser Bridge. Проведение вебинаров реализуется через плагины BigBlueButton или OpenMeetings
Отчетность	Возможность выгрузки разного вида отчетности (доступно только при использовании плагинов, которые отвечают за вид отчета и выгрузку информации)

Данная платформа имеет широкие возможности для создания обучающей системы. Это

является решающим фактором при организации дистанционного обучения. Каждая система, созданная на платформе «Moodle», благодаря плагинам и веб-разработке, обладает рядом уникальных свойств и может функционировать, выполняя действия, необходимые конкретной группе пользователей с требуемым результатом.

Существенные недостатки системы «Moodle»: нет встроенного редактора курсов, нет встроенной видеосвязи для проведения видеоконференций (только при установке соответствующих плагинов), расширенный функционал доступен лишь при использовании различных плагинов, что усложняет реализацию, уменьшает стабильность и увеличивает затраты на управление. Без использования плагинов система имеет скудный функционал, для внедрения требуются специалисты и время [3].

Обзор функциональных возможностей платформы «iSpring Learn»

Рассмотрим вторую платформу, которая тоже имеет популярность у целевой аудитории - «iSpring Learn». «iSpring Learn» это облачная система домашнего обучения с понятным и удобным интерфейсом, которую можно развернуть без дополнительной помощи специалистов и за короткий период времени [4].

Рассмотрим основные возможности данной платформы, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Основные возможности «iSpring Learn»

Работа с различными форматами файлов	Поддержка документов (PDF, DOC, XLS, SCORM), видео (FLV), аудио (MP3), презентации (PPT) и другие и их загрузка. Также возможность хранения и импорта интерактивных диалогов, курсов тестов, обучения
Работа с контентом	Работая с «iSpring Suite», есть возможность создания и редактирования курсов
Добавление пользователей	Возможность добавлять пользователей с дальнейшим объединением в группы. Также предоставление доступа к учебным материалам
Разнообразие в обучении	Использование геймификации
Наличие мобильного приложения	Поддержка обучения через мобильное приложение и в режиме офлайн
Наличие видеосвязи	Возможность проведения вебинаров, а также их запись
Отчётность	Возможность формирования полных отчетов по пользователям, мероприятиям и курсам

Благодаря редактору «iSpring Suite» можно создавать и загружать в систему курсы, диалоговые тренажеры, тесты и опросы. Существует возможность разработки контента через

внутренние платформы, например, лонгриды. Также платформа имеет современный и простой в управлении интерфейс, есть возможность быстро начать работу. Нет ограничения на количество загружаемых материалов, реализована возможность формирования подробного отчета по любому пользователю и материалу.

Основные минусы данной системы: так как данная система не является бесплатной и для полной реализации функционала, рассмотренного выше, необходимы дополнительные траты, не очень удобный интерфейс организации групп и добавления пользователей в группы, отсутствие уведомлений о новых ответах.

Обзор функциональных возможностей платформы «Google Classroom»

Рассмотрим следующую платформу - «Google Classroom». «Google Classroom» — это бесплатный сервис, который упрощает создание, распространение и оценку заданий безбумажным способом [5].

Рассмотрим основные возможности данной платформы, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Основные возможности «Google Classroom»

Общий доступ	Возможность с помощью кода присоединиться к сообществу без создания заранее созданных реестров
Работа с другими сервисами	Интеграция с продуктами Google (Google Drive)
Распространение копий документов	Возможность каждому обучающемуся предоставить индивидуальные копии документов, если задания были созданы с помощью Google-документа
Работа с заданиями	При создании задания преподаватель имеет возможность указывать сроки выполнения работы. Если ученик предоставил задание до начала срока, то на его документе появляется статус «Просмотр» для сортировки
Обратная связь	Преподаватель имеет возможность обеспечить обратную связь в тот момент, когда обучающийся находится в режиме «Просмотр». Когда работа возвращается обучающемуся, он переходит в режим «Редакция» и возобновляет работу над заданием
Контроль	Возможность контролировать работу нескольких классов. Педагоги и обучающиеся могут видеть все задания на главном экране приложения
Мониторинг выполнения заданий	Возможность у педагогов и обучающихся всегда поддерживать связь и мониторить статус каждого задания.

Основные недостатки системы «Google Classroom»: отсутствует возможность проведения вебинаров, отсутствует создание тестов, для использования данного сервиса пользовате-

лю необходимо иметь аккаунт Google, отсутствует отчётность о выполненных заданиях.

Сравнительный анализ платформ «Moodle», «iSpring Learn» и «Google Classroom»

Рассмотренные системы пользуются

большим спросом в России по организации обучения, хранению информации и организации дистанционного обучения.

В табл. 4 представлена сравнительная характеристика электронных платформ [6].

Таблица 4

Анализ платформ «Moodle», «iSpring Learn» и «Google Classroom»

Сравнительные особенности	«Moodle»	«iSpring Learn»	«Google Classroom»	Разрабатываемая платформа
Удобный интерфейс	Для разбора функционала необходимо много времени и дополнительные источники	Простой, доступный интерфейс, но не всегда дружелюбный по отношению к пользователю	Простой, удобный интерфейс	Простой, удобный и интерактивный интерфейс
Мобильность системы (развертывание системы без привлечения специалистов)	Отсутствует. Необходимо привлечение помощи разработчиков	Присутствует	Отсутствует	Присутствует
Встроенный редактор курса	Отсутствует	Отсутствует	Есть возможность создавать лекции, задания, но не тесты	Присутствует
Видеоконференция	Только с использованием дополнительных плагинов	Присутствует	Отсутствует	Присутствует
Доступный функционал	Ограничен, предусмотрено использование дополнительных плагинов	Ограничен, предусмотрено использование дополнительного платного программного обеспечения	Скучный, но есть хорошая интеграция со всеми сервисами	Расширенный функционал в основной версии
Дополнительный функционал	Реализовывается плагинами	Платное программное обеспечение «iSpring Suite»	Отсутствует	Планируемая интеграция с «Moodle» для переноса данных
Поддержка различного рода файловых расширений	Есть	Есть	Есть	Есть
Гибкость системы	Система обладает низкой гибкостью	Система обладает средней гибкостью	Система обладает средней гибкостью	Система обладает высокой гибкостью
Поддержка мобильных приложений	Есть	Есть	Нет	Предусматривается мобильная верстка
Затраты	Система бесплатная, но возможен платный дополнительный функционал	Система платная. Дополнительный функционал платный	Полностью бесплатная	Полностью бесплатная

Вывод

Исходя из проведенного анализа вышеупомянутых систем, можно сделать вывод, что рассмотренные платформы не предоставляют требуемый функционал в полной мере и в должном качестве. Следовательно, необходимо разработать такую систему, которая не только ре-

шала бы поставленные проблемы, но и была удобной в эксплуатации.

Литература

1. Полат Е.С., Моисеева М.И., Петров А.Е. Педагогические технологии дистанционного обучения: учеб. пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2006.
2. Система электронного обучения Moodle: обзор

возможностей и функционала. [Электронный ресурс]. URL: <https://lmslist.ru/free-sdo/obzor-moodle>

3. Мерецков О.В. Применение ИКТ в вузе. ЛитРес: Самиздат, 2019. 60 с.

4. Обзор СДО iSpring Learn: возможности и решаемые бизнес-задачи [Электронный ресурс]. URL: <https://lmslist.ru/sdo/obzor-ispring-online/>

5. Google Classroom: функционал и краткая инструкция по созданию онлайн-курса. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eduneo.ru/google-classroom/>

6. Зырянова Е.В., Машенко М.В. Платформы для организации электронного обучения [Электронный ресурс]. URL: <http://www.scienceforum.ru/2014/pdf/4670.pdf> (дата обращения: 01.02.2016).

Поступила 29.10.2020; принята к публикации 18.12.2020

Информация об авторах

Коваленко Сергей Александрович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: sergpc@yandex.ru

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

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

Малиновкин Владислав Алексеевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: malinovkin@mail.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF POPULAR PLATFORMS FOR LEARNING MANAGEMENT SYSTEMS

S.A. Kovalenko, A.V. Barabanov, N.I. Grebennikova, V.A. Malinovkin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: at the moment, the online education system is taking on new dimensions. The need for a platform that will harmoniously combine modern functionality and ease of use is increasing. Creating electronic platforms using the latest technical developments allows you to organize high-quality online education. This article provides an overview of the platforms, namely: "Moodle", "iSpring Learn" and "Google Classroom". These services have a large target audience and high demand in the field of online education. They can be used for both full-time and part-time training, storing course information, tests, and lectures, as well as monitoring training progress and maintaining reports. We considered the advantages and disadvantages of each service. We compare the platforms by a number of characteristics, namely: usability, mobility of the system (deployment system without the involvement of specialists), the presence of the built-in editor of the course, the availability of video conferencing, the availability of core functionality, additional functionality, support of various kinds of file extensions, the flexibility of the system, the availability of mobile applications, costs when using the platform. These aspects are the main ones when choosing a platform, as they are key when using online learning services

Key words: information storage, learning process management, platform for organizing quality education online

References

1. Polat E.S., Moiseeva M.I., Petrov A.E. "Distance learning pedagogical technologies" ("Pedagogicheskie tekhnologii distantsionnogo obucheniya"), study guide, Moscow, Akademiya, 2006.
2. "Moodle e-learning system: overview of features and functionality", available at: <https://lmslist.ru/free-sdo/obzor-moodle>
3. Meretskov O.V. "Application of ICT in a university" ("Primenenie IKT v VUZe"), LitRes, Samizdat, 2019, 60 p.
4. "iSpring Learn - distance learning system overview: opportunities and business challenges", available at: <https://lmslist.ru/sdo/obzor-ispring-online/>
5. "Google Classroom: functionality and short instructions for creating an online course", available at: <https://www.eduneo.ru/google-classroom/>
6. Zyryanova E.V., Mashchenko M.V. "E-learning platforms", available at: <http://www.scienceforum.ru/2014/pdf/4670.pdf>.

Submitted 29.10.2020; revised 18.12.2020

Information about the authors

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

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

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

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

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА О НАЗНАЧЕНИИ ЕДИНИЧНОГО ЗАДАНИЯ С ВРЕМЕННЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

С.А. Олейникова, Е.С. Менкова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: целью данной работы является разработка математического и программного обеспечения для решения задачи о назначении единичного задания с учетом ограничения на время, в течение которого оно должно быть выполнено. Другой важной особенностью является возможность корректировки уже назначенных, но еще не выполненных задач, поступивших в систему ранее. Необходимость в такой коррекции возникает в случае, если назначение специалиста и времени для данного задания в рамках существующего расписания невозможно. Выбор соответствия между специалистами и заданиями осуществляется с целью достижения максимальной эффективности, получаемой от выполнения задания. В результате получена модель, содержащая комплекс ограничений, учитывающих все особенности задачи, и целевую функцию, максимизирующую эффективность выполнения данной работы, а также всех запланированных, но еще не начатых работ. Кроме того, предложен подход к решению задачи, основанный на взаимодействии интеллектуальных агентов, каждый из которых отвечает за свое задание и осуществляет закрепление за ним специалиста и времени. Новизна подхода основывается на возможности отмены расписания, запланированного ранее, которое может быть вызвано жесткими временными ограничениями и, как следствие, невозможностью решения задачи при имеющихся данных

Ключевые слова: задача о назначениях, временные ограничения, математическая модель

Введение

Современные сложные производственные и обслуживающие системы в условиях конкуренции и непрерывно ускоряющихся темпов развития должны планировать свою деятельность таким образом, чтобы в рамках жестких временных ограничений обеспечить результат наилучшего качества. В связи с этим, к диспетчерским службам предъявляются повышенные требования, связанные с качеством расписания. В случае если необходимо определить время начала той или иной работы, задача относится к классу задач теории расписаний. Проблема распределения задач по специалистам относится к задачам о назначении.

В первую очередь, при решении данной задачи необходимо учитывать цель, которая является первоочередной для системы. В зависимости от специфики ее функционирования, это может быть эффективность от выполнения работы, равномерная загрузка оборудования и специалистов, минимизация затрат и т.д. Кроме того, данные задачи могут решаться с учетом множества ограничений. Это могут быть ограничения на время выполнения работ, на затраты, требования загруженности устройств и специалистов в пределах заданного диапазона значений и т.д.

К настоящему моменту этот класс задач достаточно глубоко исследован и получен ряд решений и методов. В частности, известен Венгерский метод, который позволяет решить классическую задачу о назначениях [1, 2]. В случае если количество исполнителей не совпадает с числом работ, задача называется обобщенной задачей о назначениях. Данная задача, в отличие от классической, уже является NP-трудной и требует каких-либо аппроксимаций или эвристик для разработки алгоритма ее решения. В частности, один из аппроксимационных алгоритмов предложен в [5]. Более подробная классификация задач о назначениях с возможными алгоритмами ее решения приведена в [4]. Однако принципиальным отличием рассматриваемой задачи от существующих аналогов является рассмотрение ее в динамике, когда уже имеется некоторое расписание занятости специалистов, и необходимо осуществить назначение таким образом, чтобы имели место временные ограничения, налагаемые на окончание выполнения работы.

Таким образом, в данной работе решается задача о назначениях с точки зрения критерия эффективности и временных ограничений. Такие параметры выбраны, исходя из требований, предъявляемых к большинству производственных и обслуживающих систем. Кроме того, в силу возможных жестких временных

ограничений, что зачастую бывает на практике, допускается возможность пересмотра ранее составленного расписания в случае невозможности закрепления за данным заданием специалиста.

Очевидно, что существующие методы невозможно применить к рассматриваемой задаче в силу ее специфических особенностей. В связи с этим, необходима разработка новых моделей и методов ее решения.

Постановка задачи и её особенности

Задачу можно сформулировать следующим образом. Пусть имеется некоторое количество рабочих, которые выполняют задания. Задания можно отнести к одному из m классов. Известна эффективность выполнения задания каждого класса j , $j=1, \dots, m$ каждым рабочим i , $i=1, \dots, n$. Предполагается, что время выполнения задания зависит от того, какой рабочий осуществляет данную работу. Предполагается, что задана матрица T , каждый элемент которой хранит сведения о времени выполнения работы класса j , $j=1, \dots, m$ исполнителем i , $i=1, \dots, n$. Известно также текущее расписание выполнения задач рабочими. Пусть в данный момент времени поступила задача, которая относится к некоторому классу j . Пусть также задано время, не позднее которого требуется завершить данную задачу. Необходимо определить рабочего для ее выполнения таким образом, чтобы эффективность от ее выполнения была максимальна при условии, что время завершения работы будет не позже, чем t .

Исходными данными для задачи будут следующие:

- список рабочих;
- список классов задач;
- эффективность выполнения задачи класса j рабочим i ;
- время решения задачи класса j рабочим i ;
- текущее расписание занятости рабочих;
- данные о поступившей работе (приоритет, время завершения, класс задания).

На выходе необходимо получить информацию:

- рабочий, который будет выполнять данную задачу;
- время исполнения.

В качестве важного допущения в данной задаче будем предполагать возможность переназначения закрепленных ранее задач за другими специалистами. Очевидно, что это воз-

можно лишь в случае, если специалист еще не начал выполнять данную работу. Такое допущение принимается по нескольким причинам:

- невозможность решить задачу о назначении при данных временных ограничениях;
- отмена для специалиста предыдущей и закрепление за ним вновь поступившей задачи позволит существенно повысить эффективность работы исследуемой системы.

Математическая модель задачи

Опишем представленную выше задачу в виде множества равенств и ограничений. Для этого введем следующие обозначения. Пусть N – количество рабочих, M – количество классов задач. Введем в рассмотрение вектор $x=(x_1, \dots, x_n)$, каждая компонента x_i которого показывает, будет ли рабочий i выполнять данную задачу. Обозначим через C матрицу, каждый элемент c_{ij} которой будет показывать эффективность выполнения задачи класса j специалистом i . Через матрицу T будем определять время, затрачиваемое на решение задачи: t_{ij} – время, которое потратит специалист i для решения задачи класса j . Обозначим через $t_{i_нач}$ время начала решения задачи специалистом i . Пусть задача относится к категории j .

Кроме того, введем в рассмотрение множество W задач, которым уже назначены исполнители, но выполнение которых еще не начато.

Тогда временные ограничения запишутся следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n x_i (t_{i_нач} + t_{ij}) \leq t. \quad (1)$$

Как и в классической задаче, ограничение на то, что данное задание выполняет один специалист, будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1. \quad (2)$$

Кроме того, необходимо требование принадлежности каждой компоненты вектора x к дискретному множеству, содержащему лишь два значения:

- 0 – специалист не выполняет данную задачу;
- 1 – специалист выполняет данную задачу.

Это можно описать следующим образом:

$$x_{ij} \in \{0,1\}. \quad (3)$$

Равенства и неравенства (1)-(3) описывают минимальный набор требований, который может быть в данной задаче. Остальные требования будут зависеть от специфики задачи. В частности, необходимо определить особенности поступающих задач или заявок. Если

это будут люди, то в дополнение к (1)-(3) возможно потребуется формулировать множество критериев, учитывающих специфику работы с людьми. Это может быть требование обслуживания в определенное время (или в пределах данного временного диапазона).

Опишем оптимизационную задачу. Возможны разные критерии оптимизации. В частности, данных критериев может быть несколько. Выберем в качестве критерия достижение максимальной эффективности от выполнения как данной задачи, так и всех остальных задач, которые еще не были начаты. К моменту планирования уже известно расписание для выполнения задач, поступивших ранее, и закрепление за ними специалистов. Обозначим за x_w специалиста, которому запланирована некоторая работа из множества W . Тогда целевая функция будет иметь вид:

$$\sum_{i=1}^n x_i c_{ij} + \sum_{w \in W} x_w c_w \rightarrow \max. \quad (4)$$

В формуле (4) с помощью c_w обозначена эффективность выполнения работы w специалистом c_w .

Принципиальным отличием данной задачи от задач о назначении, рассматриваемых ранее, является возможность корректировки соответствия между специалистами и выполняемыми ими работами, составленного ранее. Кроме того, в данной работе рассматривается наиболее простой вариант для такой задачи – подбор специалиста для выполнения единственного задания. В случае если таких заданий станет несколько, задача существенным образом усложняется.

Подход к решению задачи

Анализируя возможные варианты решения данной задачи, было принято решение использовать мультиагентный подход. Это связано с тем, что в каждый момент времени в системе находится большое количество задач, каждая из которых имеет свой приоритет и свой график выполнения. Даже в случае, если для задачи найдено решение (определено время и исполнитель), то до тех пор, пока рабочий не приступил к выполнению задачи, возможна коррекция сформированного расписания. Это связано с тем, что, возможно, пришедшая задача будет являться более приоритетной и потребует завершения в кратчайшие сроки. Возникнет необходимость поиска наилучших специалистов для ее исполнения. Если для этого потребуется скорректировать график выполнения менее приоритетной работы или работы,

которую можно перенести на более поздний период, то необходимо для нее найти другое время и, возможно, других специалистов. Следовательно, пока задача не завершит свое исполнение, ее можно считать активной.

Закрепим за каждой поступившей задачей интеллектуального агента, конечной целью которого будет являться нахождение наилучшего соотношения «исполнитель»-«время» с учетом имеющейся информации об эффективности выполнения исполнителями каждого класса задач, а также требования о времени завершения задачи. К основным действиям агента будут относиться следующие:

- инициализация;
- поиск исполнителя для выполнения работы;
- поиск времени для выполнения работы;
- взаимодействие с другими агентами в случае конфликта.

Рассмотрим данные действия более подробно. В момент фиксации поступления очередного задания система должна создать нового интеллектуального агента, который будет содержать следующие сведения:

- класс, к которому относится задание;
- время завершения задания;
- возможно также хранение информации о приоритете задания.

После этого агент должен определить наилучшего с точки зрения критерия (4) исполнителя и время. При этом должны иметь место ограничения (1)-(3). Для решения данной задачи можно предложить следующий простой алгоритм:

- отсортировать всех исполнителей по убыванию целевой функции;
- начиная с первого исполнителя, проверять выполнение ограничений: если они имеют место, то задача решена, иначе следует перейти к следующему исполнителю.

Отметим, что при сортировке возможны ситуации, когда у двух исполнителей одинаковая эффективность решения той или иной задачи. В этом случае более приоритетным должен быть специалист, который выполняет ее за меньшее время.

В данном алгоритме может возникнуть ситуация, когда ни один из исполнителей не может быть выбран для решения поставленной задачи.

Данная ситуация может возникнуть в следующих случаях.

1. Поступившая работа является приоритетной и требует скорейшего завершения. В

настоящий момент сформированное расписание таково, что все рабочие в рассматриваемый момент заняты исполнением других работ.

2. Поступившая работа требует специалистов высокой квалификации, которые в данный момент времени заняты.

Основная причина невозможности выполнения работы в срок – занятость рабочих, которые могут ее выполнить другими операциями. В этом случае для разрешения ситуации необходимо организовать взаимодействие по решению задачи с другими агентами, отвечающими за выполнение своих работ. Алгоритм может быть следующим.

Интеллектуальный агент, который отвечает за данную задачу, должен повторно пройти по списку с обращением к другим интеллектуальным агентам о возможности переноса расписания. В данном случае, целесообразно также начинать с того агента, который максимально эффективен с точки зрения выполнения данного задания. Если данный агент может перенести свое задание таким образом, чтобы выполнить поступившее задание, то задача о назначении завершена. В противном случае осуществляется переход к следующему интеллектуальному агенту.

Отметим, что при таком подходе возможна также ситуация, когда при поиске исполнителя, которому можно было бы переназначить запланированную ранее задачу, оказывается невозможным выполнить это с первого раза из-за специфики составленного расписания. Следовательно, данную процедуру целесообразно описывать рекурсивно.

Пример

Рассмотрим небольшой пример, иллюстрирующий работу данного алгоритма. Пусть имеется 6 специалистов и три класса заданий. Эффективность выполнения заданий задана с помощью матрицы:

$$\begin{pmatrix} 9 & 3 & 6 \\ 7 & 8 & 4 \\ 2 & 6 & 7 \\ 5 & 6 & 5 \\ 5 & 8 & 4 \\ 6 & 3 & 2 \end{pmatrix}$$

По строкам матрицы отложены исполнители, а по столбцам – классы заданий. В данном случае первый исполнитель может выполнить задание, относящееся к первому классу с условной эффективностью 9, второго класса –

с эффективностью 3 и т.д. Задана также матрица длительностей выполнения работ исполнителями:

$$\begin{pmatrix} 9 & 4 & 3 \\ 5 & 8 & 7 \\ 6 & 4 & 6 \\ 7 & 8 & 6 \\ 5 & 5 & 5 \\ 4 & 6 & 7 \end{pmatrix}$$

Предположим, что в данный момент времени (обозначим его $t=0$) текущее расписание исполнителей следующее (табл. 1).

Таблица 1

Занятость исполнителей. Вариант 1

Исполнитель	Интервал занятости
1	[0,6]
2	[0,3]
3	[0,5]
4	[0,1]
5	[0,6]
6	свободен

Пусть поступило задание, относящееся к классу 2, которое можно выполнить не позднее, чем за 10 единиц.

Отсортируем исполнителей по эффективности выполнения задания класса 2. В данном случае, порядок опроса будет следующим:

5,2,3,4,1,6

На следующем этапе проходим последовательно по исполнителям и определяем, может ли данный исполнитель выполнить задачу с учетом своей занятости в установленный срок.

Шаг 1. Исполнителю номер 5 требуется для выполнения задания класса 2 5 единиц, но он занят до 6 единиц. Следовательно, в данные временные рамки он выполнить задание не сможет.

Шаг 2. Исполнитель под номером 2 должен потратить для решения данной задачи 8 единиц, но он также не имеет необходимого времени, поскольку занят в течение 3 единиц выполнением задания, поступившего ранее.

Шаг 3. На третьем шаге осуществляется проверка исполнителя под номером 3. Ему для выполнения задания требуется 4 единицы времени, и он обладает достаточным резервом.

В связи с этим, алгоритм заканчивает свою работу и выдает в качестве назначения исполнителя под номером 3 время начала выполнения $t=5$. Качество выполнения данной задачи – 6 единиц.

В данном случае решение алгоритма завершилось с помощью единственного просмотра

ра возможностей исполнителей. Предложим теперь другую ситуацию. Пусть занятость исполнителей теперь будет следующая (табл. 2).

Таблица 2

Занятость исполнителей. Вариант 2

Исполнитель	Интервал занятости
1	[0,6]
2	[0,3]
3	[0,7]
4	[0,3]
5	[0,7]
6	[0,5]

В данном случае первый этап, заключающийся в поиске возможного исполнителя для работы, не приводит к благополучному исходу. Следовательно, возникает необходимость во взаимодействии интеллектуальных агентов с целью возможной перестановки ими расписания. Опишем детально второй этап.

Шаг 1. Интеллектуальный агент обращается к исполнителю 1 с целью возможного переназначения запланированных заданий. Исполнитель 1 выполняет следующие действия:

- определяет среди запланированных задач те задачи, которые еще не начались;
- осуществляет планирование согласно алгоритму, описанному ранее (т.е. выполняет первый этап для той задачи, которую можно перенести).

Пусть у первого исполнителя под номером 5, который является наилучшим для исполнения данного задания (назовем его заданием 1), в момент времени $t=1$ назначено выполнение задачи класса 1, которое длится 5 единиц и требует окончания к моменту $t=9$. Назовем его заданием 2. Соответствующий интеллектуальный агент сортирует исполнителей по убыванию эффективности выполнения задания класса 1. Получим следующую последовательность:

1, 2, 6, 4, 5, 3.

Проверяем возможность выполнения задания всеми, кроме исполнителя 5, которому в данный момент это задание назначено.

Шаг 1. Проверяем возможность выполнения данного задания исполнителем 1. Задание длится для него 9 единиц, следовательно, данному агенту это задание поручить нельзя.

Шаг 2. Исполнитель 2 может выполнить задание за 5 единиц. В данном случае задание 2 ему можно назначить, поскольку временные ограничения это допускают.

После этого исполнителю 1 можно назначить задание 1 в момент времени $t=1$.

Назначение заданий завершено. Интеллектуальный агент остается в пассивном состоянии до тех пор, пока задание не будет начато, а затем уничтожается.

Таким образом, в случае невозможности коррекции исходного расписания данная задача не имела бы решения. Смягчение требования относительно коррекции дает возможность перераспределить задания и выполнить их в заданные сроки.

Выводы

Целью данной работы являлась разработка математической модели и алгоритма, позволяющего получить решение задачи о назначениях в динамике с временными ограничениями и возможной корректировкой назначений, полученных ранее. Получены следующие результаты.

1. Получена целевая функция и ограничения для исследуемой задачи.

2. Разработан алгоритм, основанный на взаимодействии интеллектуальных агентов и отличающийся рекурсивным способом изменения существующего графика, позволяющий решать задачу о назначениях с возможностью корректировки.

3. Представлен пример, иллюстрирующий работу алгоритма.

Следующим этапом является расширение задачи до случая n параллельных заданий, поступающих в систему.

Литература

1. Бельский А.С. Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования. М.: Мир, 1992. 582 с.
2. Вагнер Г. Основы исследования операций; пер. с англ. М.: Мир, 1972. Т. 1. 336 с.
3. Менкова Е.С., Олейникова С.А. Программно-информационный комплекс для поиска оптимального решения задачи о назначениях // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2020. Т.1. № 1(38). С.46-52.
4. Леякова Л.В., Харитонов А.Г., Чернышева Г.Д. Прикладные задачи о назначениях // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 2. С. 22 -27.
5. Reuven Cohen, Liran Katzir, and Danny Raz. An Efficient Approximation for the Generalized Assignment Problem // Information Processing Letters. November 2006. Vol. 100. Issue 4. pp. 162–166.

Информация об авторах

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

Менкова Елена Сергеевна – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: menkova.1998@gmail.com

DYNAMIC PROBLEM ON ASSIGNING A SINGLE TASK WITH TIME LIMITS

S.A. Oleynikova, E.S. Menkova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the purpose of this work is the development of mathematics and software for solving the problem of assigning a single task, taking into account the time constraints during which it has to be completed. Another important feature is the ability to correct already assigned but not yet completed tasks that have entered the system earlier. The need for such correction appears if the appointment of a specialist and time for a given task within the existing schedule is impossible. The choice of correspondence between specialists and tasks is carried out in order to achieve maximum efficiency obtained from the task. As a result, a model that contains a set of constraints that take into account all the features of the task, and an objective function that maximizes the efficiency of this job, as well as all planned but not yet started work was obtained. In addition, an approach to solving the problem is proposed, based on the interaction of intelligent agents, each of which is responsible for his task and assigns a specialist and time to him. The novelty of the approach is based on the possibility of canceling the previously planned schedule, which may be caused by strict time constraints, and, as a consequence, the impossibility of solving the problem with the available data

Key words: assignment problem, time constraints, mathematical model

References

1. Belenkiy A.S. “Research of operations in transport systems: ideas and schemes of planning optimization methods” (“Issledovanie operatsiy v transportnykh sistemakh: idei i skhemy metodov optimizatsii planirovaniya”), Moscow, Mir, 1992, 582 p.
2. Vagner G. “Fundamentals of operation research” (“Osnovy issledovaniya operatsiy”), Moscow, Mir, 1972, 336p.
3. Menkova E.S., Oleynikova S.A. “Software and information system for finding the optimal solution to the assignment problem”, *Engineering Systems and Structures (Inzhenernye sistemy i sooruzheniya)*, 2020, vol.1, no. 1(38), pp. 46-52.
4. Lelyakova L.V., Kharitonova A.G., Chernysheva G.D. “Applied assignment problems”, *Bulletin of Voronezh State University (Vestnik VGU)*, 2017, no. 2, pp. 22-27.
5. Reuven Cohen, Liran Katzir, Danny Raz “An efficient approximation for the generalized assignment problem”, *Information Processing Letters*, November 2006, vol. 100, issue 4, pp. 162–166.

Submitted 28.09.2020; revised 18.12.2020

Information about the authors

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

Elena S. Menkova, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: menkova.1998@gmail.com

ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ СВЕТОФОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦВЕТОВОЙ СЕГМЕНТАЦИИ И ДЕТЕКТОРА РАДИАЛЬНОЙ СИММЕТРИИ

Р.М. Шакирзянов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия

Аннотация: в настоящее время широкое распространение получают беспилотные системы управления различными транспортными средствами, в том числе автомобилями. Управление беспилотным автомобилем предполагает решение задач, связанных с распознаванием объектов дорожной обстановки: пешеходов, автомобилей, препятствий (в виде ям, кочек, столбов, деревьев, зданий и т.д.), дорожных знаков, разметки, светофоров. Предложен алгоритм решения задачи обнаружения и распознавания сигналов светофоров круглой формы. Для решения этой задачи задействованы: быстрое преобразование радиальной симметрии, цветовая сегментация, морфологические операции. Особенностью алгоритма является то, что области расположения световых сигналов предварительно определяются по цветовому признаку с последующим уточнением формы и положения объектов на изображении. На основе предложенного метода было разработано программное обеспечение для обнаружения сигналов светофоров на фотоснимках. Программное обеспечение было протестировано на общедоступной базе изображений, содержащей светофоры. Предлагаемый алгоритм показал работоспособность, он может быть расширен в части типов распознаваемых сигналов и применён в составе систем управления беспилотными транспортными средствами, а также в составе систем помощи водителю для решения задач по предупреждению опасных и аварийных ситуаций на транспорте

Ключевые слова: компьютерное зрение, обработка изображений, быстрое преобразование радиальной симметрии, цветовая сегментация, определение светофоров

Введение

Изучением и проектированием беспилотных автомобилей занимаются многие университеты, научно-исследовательские центры, автомобильные и иные промышленные компании по всему миру с середины 1980-х годов. Известны разработки беспилотных транспортных средств, созданные гигантами (Ford, Volkswagen, Honda, Toyota, Mercedes, Tesla, Bosch, Audi, Baidu и BMW, Volvo, Kia Motors, КАМАЗ совместно с Cognitive Technologies, General Motors совместно с Lyft), в том числе машиностроительными компаниями (Ростсельмаш и Komatsu), ИТ-компаниями (Uber, Google, Яндекс), кроме того, такие разработки есть у сравнительно небольших групп разработчиков, в их числе КБ Аврора, ФГУП НАМИ, Comma.ai [1].

При создании системы управления такими автомобилями важными задачами являются обнаружение, распознавание и отслеживание объектов дорожной обстановки. Для их решения часто применяются технологии компьютерного зрения. В числе задач по обнаружению объектов на фото- или видео-изображениях можно выделить задачу распознавания световых сигналов, подаваемых светофорами. Как

правило, у человека не возникает трудностей с определением того, какой сигнал подаётся светофором, но на практике это не такая тривиальная задача, как может показаться на первый взгляд, т.к. при определении сигналов светофора сложности создают неравномерное солнечное освещение, объекты со схожей хроматической характеристикой и различные помехи. Например, компания Tesla в конце 2018 года, лишь спустя три года после начала выпуска беспилотного электромобиля, способного самостоятельно двигаться по шоссе, следовать по указанному маршруту, реагировать на манёвры других машин и распознавать препятствия на дороге, анонсировала, что её продукция научится распознавать сигналы светофоров [2]. И в 2020 году автопилот Tesla научили понимать сигналы светофоров и следовать им [3, 4].

Обнаружение и распознавание сигнала светофора включает в себя непосредственно его обнаружение и распознавание состояния (красный, зелёный или жёлтый). В литературе описаны различные способы решения этой задачи [5].

Все методы, обеспечивающие обнаружение и распознавание объектов на изображениях, можно разделить на два класса: основанные на моделях объектов и основанные на обучении. Сигналы светофора имеют чёткую структуру с точки зрения информации о цвете и

форме. Наиболее распространённые виды светофоров имеют три фонаря (по одному для каждого состояния: красный, зелёный и жёлтый) и хорошо определённую круглую форму. Поэтому целесообразно производить их обнаружение и распознавание с использованием методов на основе моделей. Эти подходы основываются на разработке алгоритмов, которые используют информацию о цвете и форме искомого объекта для построения модели. Те методы, которые использовали исключительно информацию о цвете [6,7] или форме объекта [8, 9, 10], не были достаточно точны. Чтобы увеличить их точность, использовалось сочетание различных характеристик (цвет, форма, структура) [11, 12, 13]. Например, Чжан и соавторы [12] предложили многофункциональную систему, сочетающую в себе цветовую сегментацию, анализ формы и структуры объектов, а также географической информации. Их система, однако, зависела от большого числа гиперпараметров, которые подразумевали необходимость калибровки при различных обстоятельствах. Авторы провели эксперименты на собственном частном наборе данных и заявили, что отказы были вызваны перекрытиями объектов и неравномерным потоком света. Эта комбинация подходов, однако, как оказалось, не является достаточно адекватной.

Ещё один вид подходов для решения задачи распознавания объектов – подходы на основе обучения. Вероятно, первой попыткой применения методов, основанных на обучении, было использование каскадных классификаторов [14]. Также были исследованы популярные комбинации функций HoG и Gabor с классификаторами (такими как SVM [15], AdaBoost [16] и JointBoost [17]). В последнее время такие методы (т.е. без необходимости ручного программирования алгоритмов распознавания) превзошли большинство из тех, что основаны на моделях. В работе [18] использовали данные GPS и базы данных о местоположении светофоров, чтобы идентифицировать области интереса, и свёрточную нейронную сеть (CNN), чтобы распознать состояние светофора. Кроме того, общие детекторы объектов [19, 20] были успешно применены для обнаружения светофоров (без распознавания их состояния). Подробный разбор обнаружения светофоров с использованием нейронных сетей имеется в работе [21]. Там авторы применяют YOLO [20] на наборе данных LISA [5], где достигают 90,49% AUC. Подходы, основанные на обучении, особенно те, которые используют глубокое обучение, тре-

буют больших объёмов аннотированных данных, что не всегда есть в наличии. В настоящее время в свободном доступе есть зарубежные базы изображений с аннотациями светофоров [5; 22; 23]. Однако следует также заметить, что подходы, основанные на обучении, требуют больших вычислительных мощностей.

В данной работе предложен способ определения сигналов светофоров с использованием сегментации на основе цветовой составляющей изображения и метода быстрого преобразования радиальной симметрии (Fast Radial Symmetry Transform, FRST) [24] для уточнения формы объекта. Этот подход не требует больших вычислительных мощностей и предварительного обучения.

Примеры конструкций светофоров и их изображения

Светофор является техническим устройством оптической сигнализации, который предназначен для возможности регулирования движения различных участников дорожного движения (пешеходов, велосипедов, автомобилей, автобусов, трамваев, электробусов, троллейбусов и т.д.), поездов железной дороги и метрополитена, речных и морских судов и всего транспорта. Регулирование транспорта посредством светофоров является одним из эффективных методов повышения безопасности дорожного движения.

Для регулирования дорожного движения согласно ОДМ 218.6.003-2011 «Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах» [25] светофоры классифицируются по их функциональному назначению (транспортные, пешеходные); по конструктивному исполнению (одно-, двух- или трёхсекционные, трёхсекционные с дополнительными секциями); по их роли, выполняемой в процессе управления движением (основные, дублёры, повторители). Рекомендуемая высота установки светофоров от нижнего края корпуса до поверхности проезжей части должна составлять для транспортных светофоров:

- при установке над проезжей частью от 5 до 6 м (допускается от 6 до 8 м),
- при установке сбоку от проезжей части от 2 до 3 м.

На рис. 1 представлены типы и исполнение современных светофоров. В настоящей работе рассматриваются светофоры с горизон-

тальными и вертикальными круглыми сигналами.

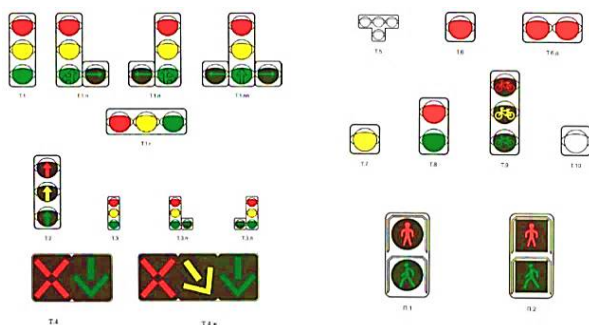


Рис. 1. Типы и исполнение светофоров

Модель изображения сигнала светофора

Выделение сигналов светофора на изображениях по цветовому признаку в условиях неравномерного освещения целесообразно производить по хроматическим составляющим цвета. В аппаратно-зависимом цветовом пространстве RGB, используемом для хранения изображений в файлах и для вывода изображений на экраны, картинка строится путём смешения базовых красного, синего и зелёного цветов в каждом пикселе. Такая схема удобна при аппаратной реализации дисплеев, однако несёт определённую сложность для анализа объектов по их цвету ввиду того, что каждый из каналов RGB несёт в себе как хроматическую, так и яркостную составляющую, что усложняет анализ изображения [26].

Цветовое пространство HSV относится к так называемой психологической группе цветовых пространств, т.е. основывается на особенности восприятия цвета человеком [26]. Имеет три канала: H – цветовой тон (hue), S – насыщенность (saturation), V – значение, яркость (value). Оно зависит от устройства, т.е. является аппаратно-зависимым, и является нелинейным преобразованием пространства RGB. Канал V отвечает за контраст и не содержит информацию о хроматической составляющей. Насыщенность S определяет чистоту цвета или, иначе, степень приближения цвета к нейтральности. Палитра HSV представлена на рис. 2, где изображены плоскости HS при следующих значениях уровня яркости (слева направо): 0, 50, 127, 205, 255. Значения в каналах S и V лежат в диапазоне $[0..255]$, в канале H – $[0..180]$.



Рис. 2. Палитра модели HSV при следующих уровнях яркости: 0, 50, 127, 205, 255

В цветовом пространстве HSV значения тона определены как значения угла в градусах в диапазоне $[0..360]$. Ввиду того, что размер канала в 1 байт не позволяет записывать туда значения больше 255, два соседних значения в канале H соответствуют смещению тона на 2 градуса. Однако значения в диапазоне $[180..255]$ для канала H также определены. На рис. 3 представлена плоскость HS при уровне яркости $V = 205$. На нём белой вертикальной полосой обозначен уровень тона $H = 180$. Как видно из рисунка, цвета циклически продолжают повторяться. Однако при поиске объектов красного цвета это не позволит задать требуемый цветовой интервал одним диапазоном $[180 - \alpha; 180 + \beta]$, где α и β – некоторые значения, определяющие ширину разброса спектра красного цвета. Красный цвет при необходимости следует задавать «кусочно» в диапазонах $[0; \beta]$ и $[180 - \alpha; 180]$, где α и β – некоторые значения, определяющие ширину разброса требуемых оттенков красного цвета.

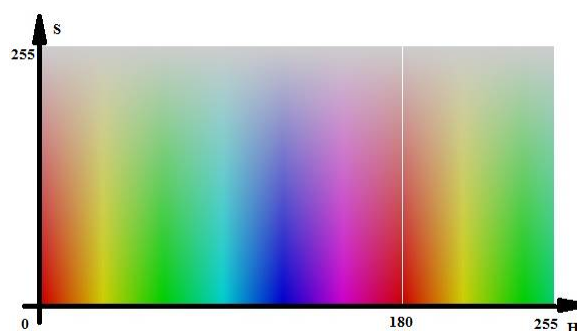


Рис. 3. Палитра HSV при уровне яркости $V = 205$

Для возможности проведения цветовой сегментации был проведён статистический анализ фотографий из базы изображений светофоров [27] и определены диапазоны цветовых компонентов рассматриваемых объектов. Введём обозначения: v – уровень яркости, лежащий в диапазоне $[0..255]$, h – цветовой тон, также лежащий в диапазоне $[0..255]$.

Красным сигналом будет считаться цвет, удовлетворяющий условиям:

$$\begin{cases} v > 155, \\ h > 0, \\ h < 17. \end{cases} \quad (1)$$

Жёлтым сигналом будет считаться цвет, удовлетворяющий условиям:

$$\begin{cases} v > 155, \\ h > 23, \\ h < 35. \end{cases} \quad (2)$$

Зелёным сигналом будет считаться цвет, удовлетворяющий условиям:

$$\begin{cases} v > 155, \\ h > 40, \\ h < 95. \end{cases} \quad (3)$$

После цветовой сегментации изображения полученные сегменты, потенциально содержащие искомые сигналы светофора каждого цвета (красный, жёлтый и зелёный), нужно подвергнуть обработке детектором радиальной симметрии, подробно описанным в работах [24, 28, 29].

Метод быстрого преобразования радиальной симметрии описан подробно в работе [24] и заключается в формировании весового изображения, в котором с каждым пикселем ассоциировано значение, отражающее его вес в качестве центра радиально-симметричного объекта заданного радиуса.

Весовое изображение формируется следующим образом. Сначала для каждого пикселя $\mathbf{p} = (x, y)$ исходного изображения I вычисляется значение градиента $g(\mathbf{p})$:

$$g(\mathbf{p}) = \sqrt{g_x^2(\mathbf{p}) + g_y^2(\mathbf{p})}, \quad (4)$$

где $g_x(\mathbf{p})$, $g_y(\mathbf{p})$ – значения горизонтального и вертикального градиентов в точке $\mathbf{p}$.

Затем для каждого значения $n \in N$, где N – множество значений радиусов симметрии, формируются O_n и M_n – изображения проекций направлений и модулей градиентов:

$$O_n(\mathbf{p}_+(\mathbf{p})) = O_n(\mathbf{p}_+(\mathbf{p})) + 1, \quad (5)$$

$$O_n(\mathbf{p}_-(\mathbf{p})) = O_n(\mathbf{p}_-(\mathbf{p})) - 1, \quad (6)$$

$$M_n(\mathbf{p}_+(\mathbf{p})) = M_n(\mathbf{p}_+(\mathbf{p})) + \|g(\mathbf{p})\|, \quad (7)$$

$$M_n(\mathbf{p}_-(\mathbf{p})) = M_n(\mathbf{p}_-(\mathbf{p})) - \|g(\mathbf{p})\|, \quad (8)$$

где $\mathbf{p}_+(\mathbf{p})$ и $\mathbf{p}_-(\mathbf{p})$ – точки, расположенные на расстоянии n по направлению градиента и против направления градиента в точке $\mathbf{p}$.

Затем для каждого значения радиуса n выполняется свёртка:

$$S_n = F_n * G_n, \quad (9)$$

где

$$F_n(\mathbf{p}) = (\tilde{O}_n(\mathbf{p}))^\alpha \tilde{M}_n(\mathbf{p}), \quad (10)$$

$$\tilde{O}_n(\mathbf{p}) = \frac{|O_n(\mathbf{p})|}{\max_{\mathbf{p}} \{|O_n(\mathbf{p})|\|}\}, \quad (11)$$

$$\tilde{M}_n(\mathbf{p}) = \frac{|M_n(\mathbf{p})|}{\max_{\mathbf{p}} \{|M_n(\mathbf{p})|\|}\}, \quad (12)$$

где α – параметр радиальной жёсткости; G_n – низкочастотный гауссов фильтр.

После вычисления изображений S_n , $n \in N$, формируется весовое изображение:

$$S = \sum_{n \in N} S_n \quad (13)$$

Помимо описанного метода, могут также использоваться его различные модифицированные версии, в которых может учитываться только прямое направление градиента либо только его обратное направление, т.е. либо используется только выражение (7), либо используется только выражение (8).

Выявленные центры принимаются за центры зажжённого фонаря светофора ввиду того, что расположены в заданном фрагменте изображения, а содержащие их области обладают требуемыми цветом и формой.

Алгоритм и программная реализация

Алгоритм обнаружения сигналов светофоров, представленный в виде блок-схемы на рис. 4, содержит следующие основные шаги:

1. Загрузка и предварительная обработка изображения. Формат изображения может быть одним из следующих: JPEG, BMP, PNG, TIFF. Ввиду той особенности, что светофоры на снимках находятся в верхней части, т.е. выше линии горизонта [30], в дальнейшую обработку поступает верхняя половина изображения.

2. Цветовая сегментация в цветовом пространстве HSV отдельно по всем трём заданным цветам. Полученные три сегментированных изображения будут использоваться для

поиска каждого типа сигнала: красного, жёлтого и зелёного цветов.

3. Применение алгоритма на основе быстрого преобразования радиальной симметрии для обнаружения сигнала светофора как светящихся элементов заданного цвета и круглой формы. Для дополнительного уточнения результата над получившимися весовыми изображениями осуществляются операции дилатации, нормализации, используются детектор Кэнни, пороговое преобразование Оцу, происходит поиск центров масс обнаруженных объектов [26].



Рис. 4. Блок-схема алгоритма обнаружения и распознавания сигналов светофоров

В результате работы алгоритма изображение сегментируется на фон и сигналы светофоров.

Реализация представленного алгоритма была выполнена на языке программирования C++ с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV [31].

Результаты экспериментов

Для апробирования работы алгоритма была выбрана база изображений светофоров [27], содержащая 13 427 фотографий с разрешением 1280x720 пикселей. На рис. 5 для иллюстрации в качестве примера приведены четыре изображения из используемой базы, снимки сделаны в различных обстановках при различных погодных условиях и освещённости. Для оценки эффективности алгоритма для ряда анализируе-

мых снимков были построены контрольные изображения, на которых вручную были отмечены соответствующие искомые объекты.



Рис. 5. Примеры исходных изображений

Результат обработки программой изображения, представленного на рис. 5 в левом верхнем углу, приведён на рис. 6. Были определены два светофора, расположенные в правой части фотографии, при этом два светофора (один слева, а другой в центре снимка) были исключены детектором радиальной симметрии на этапе уточнения формы из-за того, что имеют вид стрелки, направленной влево; фары автомобиля были исключены при проверке расположения (слишком низко для светофора), размера и цвета.



Рис. 6. Пример работы программы

Оценка эффективности работы алгоритма осуществлялась на основе методики, предложенной и описанной в работах [32, 33]. Это статистическая мера оценивания, которая основана на подсчитывании неверно классифицированных пикселей. Она относится к контролируемым эмпирическим методикам оценки и базируется на сравнении результата работы программы с эталонным изображением, размеченным вручную (так называемый ground truth образ). Для проведения оценки требуется подсчитать вероятности того, что случайно выбран-

ный пиксель на отсегментированном с помощью алгоритма изображении принадлежит искомому объекту или, соответственно, фону. Под фоном понимаются такие области исходного изображения, которые не принадлежат искомому объекту. Вероятность ошибки сегментации всего изображения определяется следующим образом:

$$p_{err} = p(b|o)p(o) + p(o|b)p(b), \quad (14)$$

где $p(o)$ – вероятность того, что случайным образом выбранный пиксель исходного изображения принадлежит объекту, $p(b)$ – вероятность того, что случайным образом выбранный пиксель исходного изображения принадлежит фону. Вероятности $p(o)$ и $p(b)$ являются априорными. Они вычисляются по контрольному изображению как отношение суммы количества пикселей (площади) объекта и, соответственно, площади фона к площади всего изображения. Вероятность $p(o|b)$ является вероятностью того, что пиксель, принадлежащий фону, при сегментации ошибочно отнесён к объекту (т.е. ошибка 1-го рода). Она вычисляется как отношение суммы пикселей фона, ошибочно отнесённых к объекту на сегментированном изображении (результате работы оцениваемого алгоритма) к сумме пикселей фона на контрольном изображении. Наконец, $p(b|o)$ – вероятность того, что пиксель, принадлежащий объекту, будет ошибочно отнесён к фону (т.е. ошибка 2-го рода), вычисляемая как отношение суммы пикселей объекта, ошибочно не отнесённых к объекту (или отнесённых к фону) на сегментированном изображении (результате работы оцениваемого алгоритма), к сумме пикселей объекта на контрольном изображении. Таким образом, $p(o|b)$ и $p(b|o)$ являются совокупными ошибками распознавания, это ошибки 1 и 2 рода соответственно.

Возможны варианты, когда искомые объекты малы по размерам по отношению ко всему изображению, т.е. $\#(o) \ll \#(D)$, где $\#(o)$ – мощность множества пикселей, принадлежащих искомому объекту, а $\#(D)$ – мощность множества пикселей всего изображения. Тогда вместо формулы (14) целесообразно применять оценку (15):

$$p_{err} = \frac{\#(o_s) - \#(o)}{\#(D)}, \quad (15)$$

где o_s – множество найденных объектов в результате сегментации. Поскольку размеры сиг-

налов светофоров на снимках имеют сравнительно небольшую площадь относительно площади всего изображения, для оценки эффективности использовалось соотношение (15).

Ниже в таблице представлены оценки ошибок 1-го и 2-го родов при обработке четырёх снимков из базы изображений [27], представленных на рис. 4, предложенным методом.

Результаты оценки работы алгоритма

№	Снимок	Ошибки 1-го рода	Ошибки 2-го рода
1	Рис. 4 (лев. верх.)	< 0,001	0,021
2	Рис. 4 (прав. верх.)	< 0,001	0,143
3	Рис. 4 (лев. нижн.)	0,093	< 0,001
4	Рис. 4 (прав. нижн.)	< 0,001	< 0,001

В соответствии с указанной методикой, произведённая оценка качества работы алгоритма на выборке фотографий из базы [27] с различными условиями освещённости и погодными условиями показывает точность работы алгоритма порядка 90%. При этом увеличение числа ошибок наблюдается при увеличении расстояния до светофора, кроме того, негативное влияние оказывает излишне яркий солнечный свет, снижающий контрастность снимка. Субъективная (визуальная) оценка показывает, что имеют место случаи пропуска некоторых объектов целиком, например, когда из трёх дублирующих друг друга светофоров один, нередко самый дальний, не определяется. При этом его признаки фиксируются на этапе цветовой сегментации, но отсеиваются на этапах уточнения формы и при финальной морфологической обработке. Увеличение чувствительности к дальним (малым) объектам повышает количество обнаруженных ложноположительных объектов. Точность работы алгоритма в дальнейшем предполагается повысить за счёт применения нейронных сетей для финальной верификации областей, потенциально содержащих сигнал светофора. При этом нейронной сети передавать не целиком анализируемое изображение, а его части, выделенные предложенным алгоритмом.

Заключение

В данной работе предложен алгоритм обнаружения светофоров на снимках, полученных

с помощью монокулярной камеры. Алгоритм использует информацию о цвете и форме объектов для того, чтобы обеспечить обнаружение красных, жёлтых и зелёных круглых сигналов светофоров, он устойчив к атмосферным воздействиям и освещению. Он может быть использован при разработке систем на основе компьютерного зрения. В качестве примеров таких систем могут служить системы управления и поддержки принятия решений беспилотным транспортом.

Литература

1. Беспилотные автомобили (мировой рынок). Режим доступа: URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотные_автомобили_\(мировой_рынок\),свободный](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотные_автомобили_(мировой_рынок),свободный). Заглавие с экрана. Яз. рус. (дата обращения 07.10.2020).
2. Already testing traffic lights, stop signs & roundabouts in development software. Your Tesla will soon be able to go from your garage at home to parking at work with no driver input at all. Режим доступа: URL: <https://twitter.com/elonmusk/status/1071845439140327424>, свободный. Заглавие с экрана. Яз. англ. (дата обращения 07.10.2020).
3. Автопилот Tesla научился распознавать сигналы светофора. Режим доступа: URL: <https://4pda.ru/2020/03/27/369797/>, свободный. Заглавие с экрана. Яз. рус. (дата обращения 07.10.2020).
4. Watch Tesla Autopilot automatically stop at red light for the first time. Режим доступа: URL: <https://electrek.co/2020/03/26/tesla-autopilot-automatically-stop-red-light-video/>, свободный. Заглавие с экрана. Яз. англ. (дата обращения 07.10.2020).
5. Vision for looking at traffic lights: Issues, survey, and perspectives/ M.B. Jensen, M.P. Philipsen, A. Møgelmoose, T.B. Moeslund, & M.M. Trivedi // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016. №17. P. 1800–1815.
6. Diaz-Cabrera M., Cerri P., & Sanchez-Medina J. Suspended traffic lights detection and distance estimation using color features// In 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Pp.1315–1320).
7. Diaz-Cabrera M., Cerri P., & Medici P. Robust real-time traffic light detection and distance estimation using a single camera// Expert Systems with Applications. 2015. № 42. Pp. 3911–3923.
8. Omachi M., & Omachi S. Detection of traffic light using structural information//In IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings. 2010. P. 809–812).
9. Tracking both pose and status of a traffic light via an interacting multiple model filter/ G. Trehard, E. Pollard, B. Bradai, & F. Nashashibi // In 17th International Conference on Information Fusion (FUSION). 2014. P. 1–7.
10. Sooksatra S., & Kondo T. Red traffic light detection using fast radial symmetry transform// In 2014 11th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). P. 1–6. IEEE.
11. Koukoumidis E., Martonosi M., & Peh L.-S. Leveraging smartphone cameras for collaborative road advisories// IEEE Transactions on mobile computing. 2011. №11. P. 707–723.
12. A multifeature fusion based traffic light recognition algorithm for intelligent vehicles/ Y. Zhang, J. Xue, G. Zhang, Y. Zhang, & N. Zheng // In Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference. 2014. P. 4924–4929. IEEE.
13. Traffic lights detection and state estimation using hidden markov models/ A.E. Gomez, F.A. Alencar, P.V. Prado, F.S. Osorio, & D.F. Wolf // In 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. P. 750–755.
14. Lindner F., Kressel U., & Kaelberer S. Robust recognition of traffic signals// In IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 2004. P. 49–53.
15. Multiple exposure images based traffic light recognition/ C. Jang, C. Kim, D. Kim, M. Lee, & M. Sunwoo // In 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. Pp. 1313–1318
16. The recognition and tracking of traffic lights based on color segmentation and camshift for intelligent vehicles/ J. Gong, Y. Jiang, G. Xiong, C. Guan, G. Tao & H. Chen // In 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Pp. 431–435.
17. Semantic segmentation based traffic light detection at day and at night/ V. Haltakov, J. Mayr, C. Unger, & S. Ilic // In German Conference on Pattern Recognition. 2015. Pp. 446–457. Springer.
18. Carina intelligent robotic car: architectural design and applications/ L.C. Fernandes, J.R. Souza, G. Pessin, P.Y. Shinzato, D. Sales, C. Mendes, M. Prado, R. Klaser, A.C. Magalhaes, A. Hata, et al.// Journal of Systems Architecture. 2014. № 60. P. 372–392.
19. Faster r-cnn: Towards realtime object detection with region proposal networks/ S. Ren, K. He, R. Girshick, & J. Sun // In Advances in neural information processing systems. 2015. Pp. 91–99.
20. Redmon J., & Farhadi A. Yolo9000: Better, faster, stronger// In 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Pp. 6517–6525.
21. Jensen M.B., Nasrollahi K., & Moeslund T.B. Evaluating state-of-the-art object detector on challenging traffic light data// In 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Pp. 882–888.
22. Behrendt K., Novak L., & Botros R. A deep learning approach to traffic lights: Detection, tracking, and classification// In 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Pp. 1370–1377.
23. Bdd100k: A diverse driving video database with scalable annotation tooling/ F. Yu, W. Xian, Y. Chen, F. Liu, M. Liao, V. Madhavan, & T. Darrell// arXiv preprint arXiv: 1805.04687. 2018
24. Lyasheva S., Shleymovich M., Shakirzyanov R. The Image Analysis Using Fast Radial Symmetry Transform in Control Systems Base on the Computer Vision// 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. 2019. P. 1-6.
25. ОДМ 218.6.003-2011 Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. Режим доступа: URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200098292>, свободный. Заглавие с экрана. Яз. рус. (дата обращения 07.10.2020).
26. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
27. Bosch Small Traffic Lights Dataset. Режим доступа: URL: <https://hci.iwr.uni-heidelberg.de/content/bosch-small-traffic-lights-dataset>, свободный. Заглавие с экрана. Яз. англ. (дата обращения 07.10.2020).
28. Evangelos A. Skodras, Doctoral Dissertation, Electrical and Computer Engineer, University of Patras. Patras, 2016. 152 с.

29. Обнаружение окружностей на изображениях с помощью метода Хафа и преобразования быстрой радиальной симметрии/ А.П. Кирпичников, С.А. Ляшева, А.А. Шакирзянова, М.П. Шлеймович, Р.М. Шакирзянов // Вестник Технологического университета. 2019. Т. 22. № 8. С. 164-167.

30. George Siogkas, Evangelos Skodras, Evangelos Dermatas. International Conference on Computer Vision Theory and Applications VISAPP "Traffic Lights Detection in Adverse Conditions using Color, Symmetry and Spatiotemporal Information." Rome, Italy, 24-26 February, 2012.

31. OpenCV. Режим доступа: URL: <https://opencv.org/>, свободный. Заглавие с экрана. Яз. англ. (дата обращения 07.10.2020).

32. Droogenbroeck V.M., Barnich O. Design of Statistical Measures for the Assessment of Image Segmentation Schemes // Proceedings of 11th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP2005), Lecture Notes in Computer Science. 2005. Vol. 3691. P. 280-287.

33. О количественной оценке эффективности алгоритмов анализа изображений / П.П. Кольцов, А.С. Осипов, А.С. Куцаев, А.А. Кравченко, Н.В. Котович, А.В. Захаров // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 4. С. 542-556. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-4-542-556.

Поступила 14.10.2020; принята к публикации 18.12.2020

Информация об авторах

Шакирзянов Ринат Михайлович – старший преподаватель, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), тел. +7-951-892-4350, e-mail: rmshakirzyanov@kai.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8162-0310>

DETECTION OF TRAFFIC SIGNALS USING COLOR SEGMENTATION AND A RADIAL SYMMETRY DETECTOR

R.M. Shakirzyanov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

Abstract: currently, unmanned systems for controlling various vehicles, including cars, are becoming widespread. Driving an unmanned vehicle involves solving problems related to the recognition of traffic objects: pedestrians, cars, obstacles (in the form of holes, bumps, poles, trees, buildings, etc.), road signs, markings, traffic lights. An algorithm for solving the problem of detecting and recognizing circular traffic signals is proposed. To solve this problem, the following are involved: rapid transformation of radial symmetry, color segmentation, morphological operations. A feature of the algorithm is that the areas of the location of the light signals are preliminarily determined by color, followed by the refinement of the shape and position of objects in the image. Based on the proposed method, software was developed for detecting traffic signals in photographs. The software was tested on a publicly available database of images containing traffic lights. The proposed algorithm has shown its efficiency, it can be expanded in terms of the types of signals recognized and used as part of control systems for unmanned vehicles, as well as part of driver assistance systems for solving problems to prevent dangerous and emergency situations

Key words: computer vision, image processing, radial symmetry transform, color segmentation, traffic light detection

References

1. "Driverless cars (global market)", available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотные_автомобили_\(мировой_рынок\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотные_автомобили_(мировой_рынок)). (accessed 07.10.2020).
2. "Already testing traffic lights, stop signs & roundabouts in development software. Your Tesla will soon be able to go from your garage at home to parking at work with no driver input at all", available at: <https://twitter.com/elonmusk/status/1071845439140327424>. (accessed 07.10.2020).
3. "Tesla Autopilot has learned to recognize traffic lights", available at: <https://4pda.ru/2020/03/27/369797/>. (accessed 07.10.2020).
4. "Watch Tesla Autopilot automatically stop at red light for the first time", available at: <https://electrek.co/2020/03/26/tesla-autopilot-automatically-stop-red-light-video/>. (accessed 07.10.2020).
5. Jensen M.B., Philipsen M.P., Møgelmoose A., Moeslund T.B., Trivedi M.M. "Vision for looking at traffic lights: Issues, survey, and perspectives", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, no. 17, pp. 1800–1815.
6. Diaz-Cabrera M., Cerri P., Sanchez-Medina J. "Suspended traffic lights detection and distance estimation using color features", *2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2012, pp.1315–1320
7. Diaz-Cabrera M., Cerri P., Medici P. Robust real-time traffic light detection and distance estimation using a single camera", *Expert Systems with Applications*, 2015, no. 42, pp. 3911–3923.
8. Omachi M., Omachi S. "Detection of traffic light using structural information", *IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings*, 2010, pp. 809–812
9. Trehard G., Pollard E., Bradai B., Nashashibi F. "Tracking both pose and status of a traffic light via an interacting multiple model filter", *17th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, 2014, pp. 1–7

10. Sooksatra S., Kondo T. "Red traffic light detection using fast radial symmetry transform", *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2014, pp. 1–6.
11. Koukoumidis E., Martonosi M., Peh L.-S. "Leveraging smartphone cameras for collaborative road advisories", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2011, no. 11, pp. 707–723.
12. Zhang Y., Xue J., Zhang G., Zhang Y., Zheng N. "A multifeature fusion based traffic light recognition algorithm for intelligent vehicles", *Proc. of the 33rd Chinese Control Conference*, 2014, pp. 4924–4929.
13. Gomez A.E., Alencar F.A., Prado P.V., Osorio F.S., Wolf D.F. "Traffic lights detection and state estimation using hidden Markov models", *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, 2014, pp. 750–755.
14. Lindner F., Kressel U., Kaelberer S. "Robust recognition of traffic signals", *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2004, pp. 49–53.
15. Jang C., Kim C., Kim D., Lee M., Sunwoo M. "Multiple exposure images based traffic light recognition", *2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings*, 2014, pp. 1313–1318.
16. Gong J., Jiang Y., Xiong G., Guan C., Tao G., Chen H. "The recognition and tracking of traffic lights based on color segmentation and camshift for intelligent vehicles", *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2010, pp. 431–435.
17. Haltakov V., Mayr J., Unger C., Ilic S. Semantic segmentation based traffic light detection at day and at night", *German Conference on Pattern Recognition*, Springer, 2015, pp. 446–457.
18. Fernandes L.C., Souza J.R., Pessin G., Shinzato P.Y., Sales D., Mendes C., Prado M., Klaser R., Magalhaes A.C., Hata A., et al. "Carina intelligent robotic car: architectural design and applications", *Journal of Systems Architecture*, 2014, no. 60, pp. 372–392.
19. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. "Faster r-cnn: Towards realtime object detection with region proposal networks", *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2015, pp. 91–99.
20. Redmon J., Farhadi A. "Yolo9000: Better, faster, stronger", *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017, pp. 6517–6525.
21. Jensen M.B., Nasrollahi K., Moeslund T.B. "Evaluating state-of-the-art object detector on challenging traffic light data", *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2017, pp. 882–888.
22. Behrendt K., Novak L., Botros R. "A deep learning approach to traffic lights: Detection, tracking, and classification", *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, pp. 1370–1377.
23. Yu F., Xian W., Chen Y., Liu F., Liao M., Madhavan V., Darrell T. "Bdd100k: A diverse driving video database with scalable annotation tooling", *arXiv preprint arXiv*, 2018, 1805.04687.
24. Lyasheva S., Shleymovich M., Shakirzyanov R. "The image analysis using fast radial symmetry transform in control systems based on the computer vision", *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019*, pp. 1–6.
25. "ODM 218.6.003-2011 Guidelines for the design of traffic light objects on highways", available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200098292>. (accessed 07.10.2020).
26. Gonzalez R., Woods R. "Digital image processing" ("Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy"), Moscow, Tekhnosfera, 2012, 1104 p.
27. "Bosch Small Traffic Lights Dataset", available at: <https://hci.iwr.uni-heidelberg.de/content/bosch-small-traffic-lights-dataset>. (accessed 07.10.2020).
28. Evangelos A. Skodras, Dr. diss., Electrical and Computer Engineer, University of Patras, Patras, 2016, 152 p.
29. Kirpichnikov A.P., Lyasheva S.A., Shakirzyanova A.A., Shleymovich M.P., Shakirzyanov R.M. "Detection of circles in images using the Hough method and fast radial symmetry transformation", *Bulletin of Technological University (Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 22, no. 8, pp. 164–167.
30. Siogkas G., Skodras E., Dermatas E. "Traffic lights detection in adverse conditions using color, symmetry and spatiotemporal information", *International Conference on Computer Vision Theory and Applications VISAPP*, Rome, Italy, 24–26 February, 2012.
31. "OpenCV", available at: <https://opencv.org/> (accessed 07.10.2020).
32. Droogenbroeck V.M., Barnich O. "Design of statistical measures for the assessment of image segmentation schemes", *Proc. of the 11th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP2005), Lecture Notes in Computer Science*, 2005, vol. 3691, pp. 280–287.
33. Koltsov P.P., Osipov A.S., Kutsaev A.S., Kravchenko A.A., Kotovich N.V., Zakharov A.V. "On the quantitative evaluation of the effectiveness of image analysis algorithms", *Computer Optics (Komp'yuternaya optika)*, 2015, vol. 39, no. 4, pp. 542–556.

Submitted 14.10.2020; revised 18.12.2020

Information about the author

Rinat M. Shakirzyanov, Assistant Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, (10 Karl Marx str., Kazan 420111, Rep. Tatarstan, Russia), e-mail: RMsShakirzyanov@kai.ru, tel.: +7-951-892-4350, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8162-0310>

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ДЕРЕВА ДОСТИЖИМОСТИ ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Д.С. Звягин

Воронежский институт МВД России, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описываются основные определения дерева достижимости сетей Петри. Также рассматриваются различные примеры стохастических сетей Петри, в которых после выставления начальных маркировок в первых позициях определяются значения во всех остальных позициях. Показаны примеры определения маркировок при помощи высчитывания вектора диагональной свертки. Для каждого примера стохастической сети Петри проводится анализ данной сети. Данный анализ необходим для различных распределительных систем и процессов, особенно на заключительном этапе. Основными методами анализа являются дерево достижимости и матричные уравнения. Рассматривается один из таких методов анализа сетей Петри. С использованием дерева достижимости можно проанализировать, выявить и исправить сбои в процессах, которые могут произойти при наличии тупиковых состояний и при неправильной последовательности срабатывания переходов. Исходя из рассмотренных примеров предлагается обобщенный алгоритм построения дерева достижимости для стохастических сетей Петри. Предложенный алгоритм построения дерева достижимости стохастических сетей Петри можно применять для всех сетей как с конечным, так и с бесконечным множеством достижимости. Данный алгоритм будет являться полезным инструментом при анализе стохастических сетей Петри

Ключевые слова: моделирование, стохастические сети Петри, дерево достижимости

Введение

Рассматривая различные распределительные системы и процессы, особенно на заключительном этапе, необходимо проводить анализ данных систем. Для этого удобно использовать аппарат сетей Петри, позволяющий структурировать процесс в виде графа. Сеть Петри – это ориентированный граф, состоящий из множества вершин и переходов, соединяющихся между собой дугами. Дуги могут соединять вершину с переходом и переход с вершиной и обладать входными и выходными функциями. По сети возможно движение меток (фишек) в зависимости от срабатывания определенных переходов, тем самым определяя работу рассматриваемой системы. Сбой в процессах и системах может произойти при неправильной последовательности срабатывания переходов, при наличии тупиковых состояний, которые можно выявить, используя необходимые для этого методы анализа сетей Петри. Дерево достижимости и матричные уравнения – это два основных метода анализа, являющихся механизмом решения проблем, связанных со сбоем в процессах и системах [1, 2].

Постановка задачи

При анализе различных стохастических сетей Петри можно столкнуться с тупиковыми

состояниями, при которых невозможна работа системы. Для выявления таких проблем будет использоваться дерево достижимости, которое позволит показать все возможные переходы сети из одного состояния в другое. Для удобства построения такого дерева для стохастических сетей необходимо разработать алгоритм, рассмотрев различные примеры. Доказательством работоспособности данного алгоритма должна являться невозможность создания новых граничных вершин.

Решение

Дерево достижимости представляет собой множество достижимости сети Петри. Построение дерева осуществляется при определении множества значений позиций при последовательном срабатывании переходов. Для построения дерева, являющегося полезным инструментом анализа, необходимо ограничить его до конечного размера. Ограничение происходит тогда, когда все вершины являются дублирующими, терминальными и внутренними.

Определение 1. Граничные вершины – новые необработанные вершины, которые после обработки становятся внутренними, терминальными или дублирующими.

Определение 2. Внутренние вершины – обработанные граничные вершины, расположенные внутри дерева и не являющиеся терминальными или дублирующими.

Определение 3. Дублирующие вершины – обработанные граничные вершины, маркировки которых совпадают с ранее встречающимися в дереве вершинами.

Определение 4. Терминальные вершины – обработанные граничные вершины, в которых нет разрешенных переходов.

Рассмотрим примеры построения дерева достижимости для различных стохастических сетей Петри.

Пример 1.

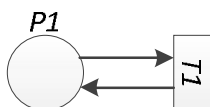


Рис. 1. Пример стохастической сети Петри

Пусть начальная маркировка будет:
 $\mu^s(P_1) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$.

После срабатывания перехода T_1 маркировка позиции P_1 имеет следующий вид:

$$\bar{\mu}^s(P_1) = \delta(\mu^s(P_1), T_1) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Дерево достижимости для данной сети выглядит так:

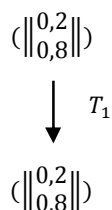


Рис. 2. Дерево достижимости стохастической сети Петри, приведенной из рис. 1

В данном случае алгоритм построения дерева достижимости останавливается, так как обе вершины являются дублирующими.

Пример 2.

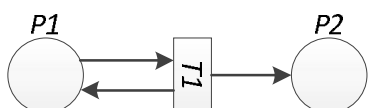


Рис. 3. Пример стохастической сети Петри

Начальная маркировка: $\mu^s(P_1) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$,
 $\mu^s(P_2) = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Для наглядности данную модель можно изобразить следующим образом:

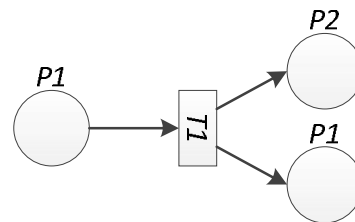


Рис. 4. Пример модели стохастической сети Петри

После первого срабатывания перехода T_1 маркировки позиций P_1 и P_2 имеют следующий вид:

$$\bar{\mu}^s(P_1) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}, \quad \bar{\mu}^s(P_2) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

После второго срабатывания перехода T_1 маркировка позиций P_1 и P_2 имеют следующий вид:

$$\bar{\mu}^s(P_1) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

а маркировка выходной позиции $\bar{\mu}^s(P_2)$ перехода T_1 равна вектору диагональной свертки вектора $\mu^s(P_2)$ и вектора $[3, 4]$:

$$r^T = \begin{pmatrix} r_0 & r_1 & \dots & r_k \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где

$$k = \#(P_2, O(T_1)) = 1; \quad (5)$$

$$r_k = r_1 = [\sum_{\alpha=1}^1 \mu_{\alpha}^s(P_1)] = 0,8; \quad (6)$$

$$r_0 = 1 - r_k = 1 - 0,8 = 0,2. \quad (7)$$

Окончательно: $r^T = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$. Определим матрицу Грама векторов $\mu^s(P_2)$ и r .

$$G(\mu^s(P_2), r) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,2 & 0,8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,04 & 0,16 \\ 0,16 & 0,64 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Вектор диагональной свертки $di(G(\mu^s(P_2), r))$ в данном случае будет равен:

$$di(G(\mu^s(P_2), r)) = \begin{pmatrix} 0,04 \\ 0,32 \\ 0,64 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Таким образом, маркировка позиции P_2 после второго срабатывания перехода T_1 :

$$\bar{\mu}^s(P_2) = di(G(\mu^s(P_2), r)) = \begin{Bmatrix} 0,04 \\ 0,32 \\ 0,64 \end{Bmatrix}. \quad (10)$$

Аналогично, после третьего срабатывания перехода T_1 маркировка позиций P_1 и P_2 имеет следующий вид:

$$\bar{\mu}^s(P_1) = \begin{Bmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{Bmatrix}, \quad \bar{\mu}^s(P_2) = \begin{Bmatrix} 0,008 \\ 0,0384 \\ 0,384 \\ 0,512 \end{Bmatrix}. \quad (11)$$

Как видно, размерность маркировки позиции $\bar{\mu}^s(P_2)$ после третьего срабатывания перехода T_1 равна 3, и с последующими срабатываниями перехода T_1 данная размерность будет увеличиваться. Маркировку данной позиции

при построении дерева достижимости будем обозначать символом ∞ (бесконечность).

Определение 5. Бесконечность ∞ - бесконечная размерность маркировки, получающаяся из циклов одной и той же позиции.

Если же при многократном срабатывании другого перехода этой же позиции размерность уменьшается и стремится к 0, то маркировку данной позиции будем обозначать ∞ .

Исходя из расчетов, приведенных выше, видно, что нулевая компонента маркировки $\bar{\mu}_0^s(P_2)$ после каждого срабатывания перехода T_1 уменьшается (1; 0,2; 0,04; 0,008), то есть вероятность отсутствия фишек в позиции увеличивается (рис. 5).

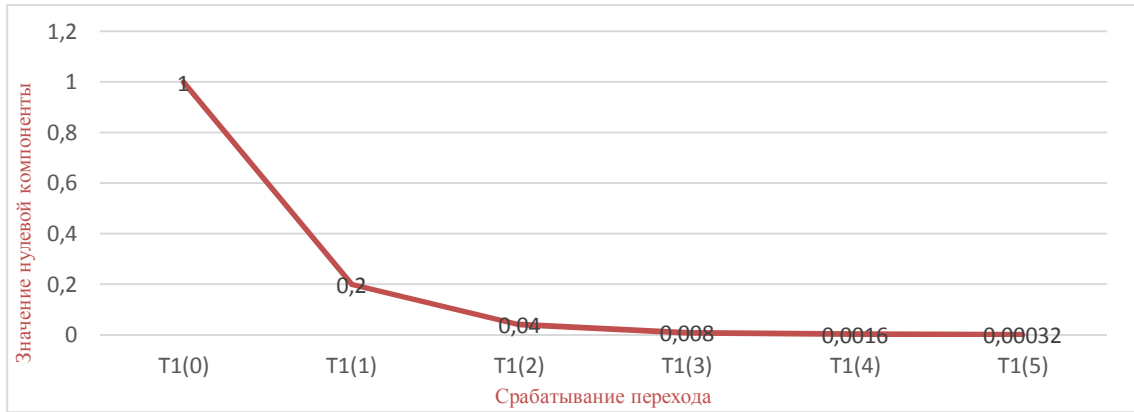


Рис. 5. Распределение значения компоненты $\bar{\mu}_0^s(P_2)$ при последовательном срабатывании перехода T_1

Дерево достижимости для данной сети выглядит так:

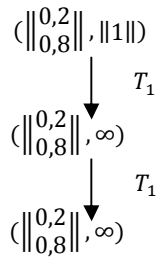


Рис. 6. Дерево достижимости стохастической сети Петри, приведенной из рис. 3

В данном случае построение дерева достижимости останавливается, так как две нижние вершины являются дублирующими.

Пример 3.

Начальная маркировка: $\mu^s(P_1) = \begin{Bmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{Bmatrix}$, $\mu^s(P_2) = \|1\|$, $\mu^s(P_3) = \|1\|$.

В этой начальной маркировке разрешены два перехода T_1 и T_2 . Для того, чтобы найти все множества достижимости, первоначально необходимо определить новые вершины в дереве для маркировок, получаемых при срабатывании перехода T_1 и T_2 (рис. 8).

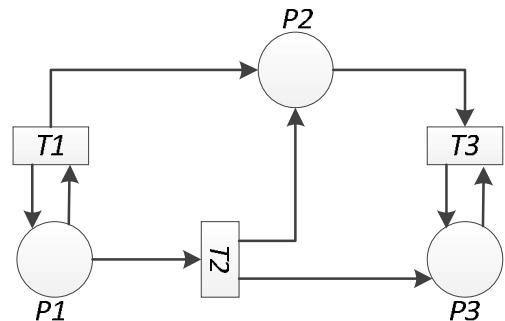


Рис. 7. Пример модели стохастической сети Петри

При срабатывании перехода T_1 получаем следующую маркировку: $\mu^s(P_1) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$, $\mu^s(P_2) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$, $\mu^s(P_3) = \|1\|$.

При срабатывании перехода T_2 получаем: $\mu^s(P_1) = \|1\|$, $\mu^s(P_2) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$, $\mu^s(P_3) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$.

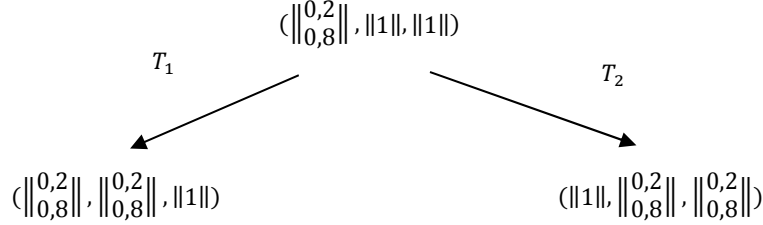


Рис. 8. Первый этап построения дерева достижимости стохастической сети Петри, приведенной из рис. 7

На втором этапе необходимо рассмотреть все маркировки, достижимые из вышеописанных маркировок.

Из маркировки $(\begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}, \|1\|)$ можно запустить два перехода: T_1 и T_2 .

При срабатывании перехода T_1 маркировки позиций P_1 и P_3 остаются неизменными, а маркировка позиции P_2 вычисляется при помощи определения вектора диагональной свертки $di(G(\mu^s(P_2), r))$:

$$\bar{\mu}^s(P_2) = di(G(\mu^s(P_2), r)) = \begin{pmatrix} 0,04 \\ 0,32 \\ 0,64 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

При срабатывании перехода T_2 маркировка позиций $P_1 = \|1\|$ и $P_3 = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$, а маркировка позиции P_2 вычисляется при помощи определения вектора диагональной свертки $di(G(\mu^s(P_2), r))$, аналогично вышеописанным вычислениям:

$$\bar{\mu}^s(P_2) = di(G(\mu^s(P_2), r)) = \begin{pmatrix} 0,04 \\ 0,32 \\ 0,64 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Из маркировки $(\|1\|, \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix})$ можно запустить только переход T_3 . При срабатывании перехода T_3 маркировка позиций $P_1 = \|1\|$ и $P_2 = \|1\|$, а маркировка позиции P_3 вычисляется при помощи определения вектора диагональной свертки $di(G(\mu^s(P_3), r))$:

$$\bar{\mu}^s(P_3) = di(G(\mu^s(P_3), r)) = \begin{pmatrix} 0,36 \\ 0,64 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

В итоге, на втором этапе получаем следующую маркировку:

- при срабатывании перехода T_1 : $\mu^s(P_1) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$, $\mu^s(P_2) = \begin{pmatrix} 0,04 \\ 0,32 \\ 0,64 \end{pmatrix}$, $\mu^s(P_3) = \|1\|$;

- при срабатывании перехода T_2 : $\mu^s(P_1) = \|1\|$, $\mu^s(P_2) = \begin{pmatrix} 0,04 \\ 0,32 \\ 0,64 \end{pmatrix}$, $\mu^s(P_3) = \begin{pmatrix} 0,2 \\ 0,8 \end{pmatrix}$;

- при срабатывании перехода T_3 : $\mu^s(P_1) = \|1\|$, $\mu^s(P_2) = \|1\|$, $\mu^s(P_3) = \begin{pmatrix} 0,36 \\ 0,64 \end{pmatrix}$.

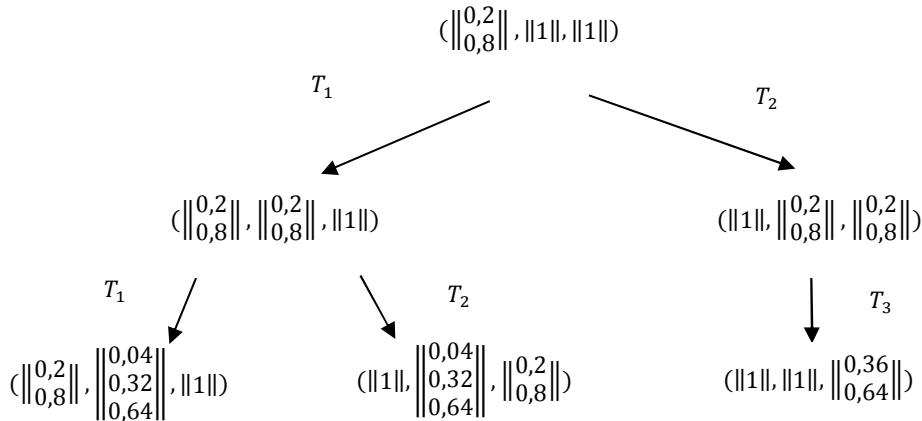


Рис. 9. Второй этап построения дерева достижимости стохастической сети Петри, приведенной из рис. 7

На третьем этапе необходимо рассмотреть все маркировки, достижимые из вышеописанных маркировок.

Из маркировки $(\|0,2\|, \|0,04\|, \|1\|)$
 $(\|0,8\|, \|0,32\|, \|0,64\|)$

можно запустить два перехода: T_1 и T_2 .

При срабатывании перехода T_1 маркировки позиций P_1 и P_3 остаются неизменными, а маркировка позиции P_2 вычисляется при помощи определения вектора диагональной свертки $di(G(\mu^s(P_2), r))$: $\mu^s(P_1) = \|0,2\|$,

$$\mu^s(P_2) = \begin{pmatrix} 0,008 \\ 0,096 \\ 0,384 \\ 0,512 \end{pmatrix}, \mu^s(P_3) = \|1\|.$$

При срабатывании перехода T_2 маркировки позиций равны: $\mu^s(P_1) = \|1\|$, $\mu^s(P_2) =$

$$= \begin{pmatrix} 0,008 \\ 0,096 \\ 0,384 \\ 0,512 \end{pmatrix}, \mu^s(P_3) = \|0,2\|.$$

Из маркировки $(\|1\|, \|0,04\|, \|0,2\|)$
 $(\|0,32\|, \|0,64\|)$

можно запустить только переход T_3 .

При срабатывании перехода T_3 маркировки позиций равны: $\mu^s(P_1) = \|1\|$, $\mu^s(P_2) = \|0,36\|$, $\mu^s(P_3) = \|0,744\|$.

Из маркировки $(\|1\|, \|1\|, \|0,36\|)$
 $(\|0,64\|)$ невозможно запустить ни один из переходов, то есть данная вершина является терминальной.

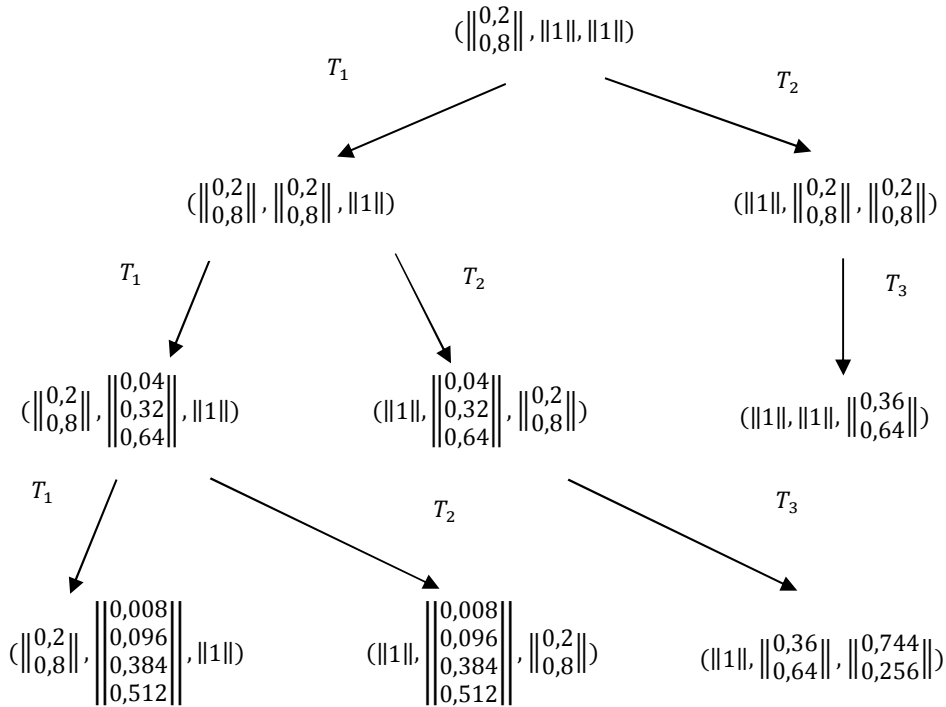


Рис. 10. Третий этап построения дерева достижимости стохастической сети Петри, приведенной из рис. 7

Рассматривая дерево достижимости данной стохастической сети Петри дальше, можно заметить, что срабатывание перехода T_1 будет бесконечным. При увеличении срабатывания перехода T_1 увеличивается количество срабатываний T_3 после срабатывания перехода T_2 ($T_1 T_2 T_3 T_3, T_1 T_2 T_3 T_3 T_3 \dots$). При срабатывании переходов $T_1 T_1 \dots T_1$ размерность маркировки позиции P_2 увеличивается и стремится к бесконечности: $r(\bar{\mu}^s(P_2)) \rightarrow \infty$. Рассматривая вет-

ви дерева достижимости $T_1 T_2 T_3 T_3, T_1 T_2 T_3 T_3 T_3 \dots$ после срабатывания переходов T_3 , нулевая компонента позиции P_3 стремится к 1: $\bar{\mu}_0^s(P_3) \rightarrow 1$.

Исходя из всего вышеописанного, можно предложить следующий алгоритм построения дерева достижимости стохастических сетей Петри.

Пусть x – граничная вершина дерева, которую необходимо обработать.

1. Если в дереве имеется другая вершина, не являющаяся граничной и имеющая такую же маркировку, как и у вершины x , то такая вершина является дублирующей.

2. Если из маркировки вершины x не доступен ни один из переходов, то такая вершина является терминальной.

3. При разрешенном переходе T_i из вершины x можно создать вершину y , тогда маркировка данной вершины определяется следующим образом:

а) Если размерность маркировки одной из позиций вершины x равна бесконечности, то размерность маркировки этой же позиции вершины y также будет равна бесконечности.

б) Если на пути от начальной вершины к x существует вершина z , для которой размерность маркировок всех позиций меньше, чем размерность маркировок всех позиций x , и

размерность маркировки определенной позиции меньше, чем размерность маркировки этой же позиции x после срабатывания перехода, то назначается значение размерности маркировки позиции $x = \infty$.

с) Если размерности маркировок позиций не меняются, но значение вероятностей нулевых компонент увеличивается, т.е. $\bar{\mu}_0^s(P_i) \rightarrow 1$, то такая маркировка обозначается символом ε , что соответствует единичной.

д) В противном случае маркировка позиций вершин равна вектору диагональной свертки $di(G(\mu^s(P_i), r))$.

Алгоритм построения дерева достижимости стохастических сетей Петри завершается тогда, когда все вершины в нем будут являться терминальными, дублирующими или внутренними (рис. 11).

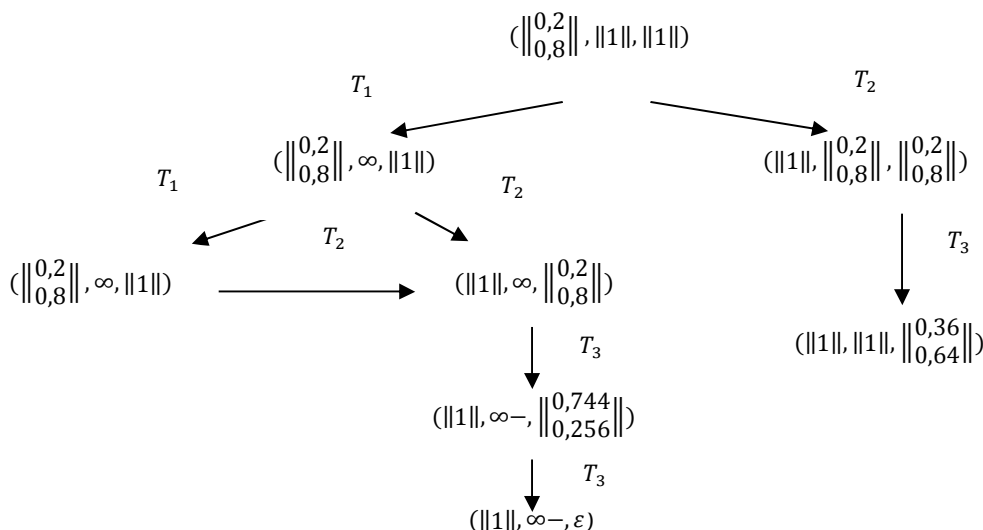


Рис. 11. Дерево достижимости стохастической сети Петри, приведенной из рис. 7

Заключение

Предложенный алгоритм построения дерева достижимости стохастических сетей Петри можно применять для всех сетей как с конечным, так и с бесконечным множеством достижимости. Данный алгоритм будет являться полезным инструментом при анализе стохастических сетей Петри. В дальнейшем для удобства анализа алгоритм построения дерева достижимости можно применить для исследования и моделирования процесса производства судебной почерковедческой экспертизы [5].

Литература

1. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.
2. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 160 с.
3. Звягин Д.С. Моделирование процесса производства судебной почерковедческой экспертизы с использованием стохастических сетей Петри // Вестник Воронежского института МВД России. 2020. № 2. С. 154–163.
4. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. Л.: Наука, 1989. 133 с.
5. Пьянков О.В., Звягин Д.С. Моделирование процесса производства судебной почерковедческой экспертизы при помощи сетей Петри // Вестник Воронежского института МВД России. 2020. № 1. С. 57–64.

Информация об авторах

Звягин Данил Сергеевич - преподаватель кафедры информационной безопасности, Воронежский институт МВД России (394065, Россия, г. Воронеж, проспект Патриотов, 53), e-mail: danil_exp@mail.ru, тел. 8-920-215-21-55

ALGORITHM FOR CONSTRUCTING A REACHABILITY TREE FOR STOCHASTIC PETRI NETS

D.S. Zvyagin

Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Voronezh, Russia

Abstract: the article describes the basic definitions of the reachability tree of Petri nets. It also considers various examples of stochastic Petri nets, in which, after setting the initial markings in the first positions, the values in all other positions are determined. The work shows examples of determining markings by calculating the vector of the diagonal convolution. Each example of a stochastic Petri net is analyzed. This analysis is necessary for various distribution systems and processes, especially in the final stage. The main analysis methods are reachability tree and matrix equations. I consider one of such methods for analyzing Petri nets. Using the reachability tree, you can analyze, identify, and correct process failures that can occur when there are deadlocks and when transitions are fired incorrectly. Based on the examples considered, I propose a generalized algorithm for constructing a reachability tree for stochastic Petri nets. The proposed algorithm for constructing the reachability tree of stochastic Petri nets can be applied to all nets with both finite and infinite reachability sets. This algorithm will be a useful tool for analyzing stochastic Petri nets

Key words: modeling, stochastic Petri nets, reachability tree

References

1. Peterson J. "The theory of Petri nets and modeling of systems", Moscow, Mir, 1984, 264 p.
2. Kotov V.E. "Petri nets" ("Seti Petri"), Moscow, Nauka, 1984, 160 p.
3. Zvyagin D.S. "Modeling the production process of forensic handwriting expertise using stochastic Petri nets", *Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2020, no. 2, pp. 154-163.
4. Leskin A.A., Mal'tsev P.A., Spiridonov A.M. "Petri nets in modeling and control" ("Seti Petri v modelirovanii i upravlenii"), Leningrad, Nauka, 1989, 133 p.
5. P'yankov O.V., Zvyagin D.S. "Modeling the production process of forensic handwriting expertise using Petri nets", *Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2020, no. 1, pp. 57-64.

Submitted 23.09.2020; revised 18.12.2020

Information about the author

Danil S. Zvyagin, Assistant Professor, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov Avenue, Voronezh 394065, Russia), e-mail: danil_exp@mail.ru, tel. +7-920-215-21-55

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ДЕСТРУКЦИИ СШИТЫХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

С.Л. Подвальный¹, А.П. Попов², А.В. Карманов¹, Г.С. Тихомиров³, Н.К. Образцов²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия

³Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: проведенные ранее научные исследования в области радиационной деструкции отработанных полимерных материалов, отходов и резинотехнических изделий, а также их термомеханической обработки недостаточны для проектирования и автоматизации технологических линий производства регенерата в промышленных условиях. Представлены результаты разработки системы поддержки принятия решений для процесса регулируемой деструкции смоляных вулканизатов бутилкаучука при комбинированных воздействиях радиационной и термомеханообработки. Разработанная система является основным функциональным элементом синтезируемой системы управления. Определены управляющие параметры для процесса деструкции. Проведен системный анализ процесса получения бутилрегенерата как объекта управления. Предложен способ управления стадиями технологического процесса, при котором используется комбинация управляющих воздействий. Выполнен синтез структуры математического обеспечения системы поддержки принятия решений. Сформированы частные критерии поиска оптимальных параметров, установлена структура связей между ними и выбран метод агрегирования обобщенного критерия. С использованием нечеткого интеграла Шоке и нечеткой меры Сугено разработан алгоритм оценки оптимальных параметров процесса. Задача поиска оптимальных параметров осуществлена с использованием генетического алгоритма. Получены результаты вычислительных экспериментов многокритериальной оптимизации управляющих параметров. Разработан алгоритм управления процессом деструкции при комбинированных управляющих воздействиях

Ключевые слова: деструкция, ионизационное облучение, механообработка, математическая модель, управление процессом, система поддержки принятия решений

Благодарности: работа выполнена в рамках гранта программы «У.М.Н.И.К-2018», г/к № 14279ГУ/2019 от 10.07.2019 г.

Введение

Современные системы управления технологическими процессами построены на всестороннем анализе объекта управления и, соответственно, на построении его математической модели для последующего использования в контуре управления. Рассматриваемый в данной работе процесс деструкции обладает рядом специфических особенностей как с точки зрения его оптимального проведения в промышленных условиях, так и с точки зрения приемов управления с использованием систем автоматизации. Анализ результатов исследований физической природы процессов деструкции полимерных материалов [1-2] показал, что в полимерной матрице происходит ряд последовательных и параллельных превращений, таких как вырожденное разветвление, обрыв и рекомбинация полимерных цепей. Поэтому при выборе физических условий протекания деструкции необходимо учитывать их влияние на скорость протекания каждой стадии, а

также на интенсивность изменения молекулярной массы полимера, его пространственной структуры и физико-механических свойств. При этом влияние того или иного фактора на скорость химических превращений зависит от начального физического состояния, природы полимерной матрицы, аппаратного оформления, в котором протекает процесс деструкции [3-5]. Следовательно, для выбора и обоснования способа управления динамикой процесса получения регенерата с заданными показателями качества необходимо провести исследование физических факторов, которые оказывают существенное влияние на интенсивность разрыва макромолекул и межмолекулярных связей [6-8].

В соответствии с классификацией, по типу преобладающих превращений в полимерной матрице, композиции на основе бутилкаучука относятся к материалам, преимущественно подверженным деструкции при внешних воздействиях [9-12]. В процессе получения регенерата основными стадиями являются процессы, вызванные радиационно-химическими и термомеханическими воздействиями.

Для реализации процесса управляемой деструкции сшитых полимеров при комбинированных внешних воздействиях необходимо выполнить алгоритмический и структурный синтез системы автоматизированного управления на базе системы поддержки принятия решений (СППР). Эти решения являются основой для проектирования и автоматизации процесса производства регенерата.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования при разработке системы управления процессом деструкции сшитых полимеров рассмотрены процессы обработки вулканизатов бутилкаучука ионизирующим излучением и механическим напряжением при его одновременном нагреве.

Основные процессы получения регенерата бутилкаучука (бутилрегенерата) протекают в двух промышленных аппаратах: ускорителе электронов и экструдере, где под действием факторов различной физической природы протекают физико-химические превращения.

Перед проектируемой автоматизированной системой управления (АСУ) поставлена задача, заключающаяся в определении оптимальных режимных параметров и их поддержании на заданном уровне. Это обеспечит протекание процесса деструкции с контролируемой скоростью, с учетом состава и свойств исходного сырья.

Результаты математического моделирования процессов радиационной и термомеханической деструкции [13-16] позволили получить количественное описание скоростей физико-химических превращений в зависимости от варьирования величин внешних воздействий.

Результаты и их обсуждение

Результаты имитационного моделирования показали, что основными управляющими параметрами процесса деструкции вулканизатов бутилкаучука при комбинированных внешних воздействиях являются: суммарная поглощенная доза облучения, температура и продолжительность механической обработки облученного образца.

С целью теоретического обоснования выбора способа управления физико-химическими процессами, протекающими в основных технологических аппаратах, проведен системный анализ технологического процесса как объекта управления [17-18]. Применяв метод параметризации, определен перечень величин, являющих-

ся основными переменными состояния. Для каждой из стадий процесса выявлены основные и перекрестные связи между управляющими воздействиями и физико-химическими параметрами реакционной среды. На рис. 1 представлена структурная схема 1-й и 2-й технологической стадий как объектов управления.

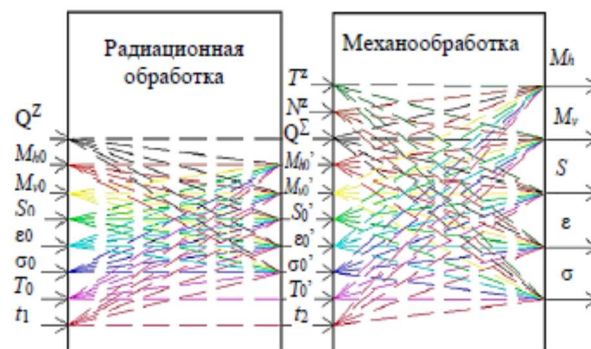


Рис. 1. Структурная схема процесса получения бутилрегенерата как объекта управления

1-я стадия – радиационная обработка – включает такие входные параметры, как:

- Q^Z - рассчитанная оптимальная доза обработки;
- M_{h0} - начальная вязкость по Муни бутилрегенерата;
- M_{v0} - начальная молекулярная масса бутилрегенерата;
- S_0 - начальное значение концентрации поперечных связей полимерной матрицы;
- ϵ_0 - начальное значение относительного удлинения регенерата;
- σ_0 - начальное значение прочности на разрыв регенерата;
- T_0 - начальная температура бутилрегенерата;
- t_1 - время обработки в ускорителе электронов.

Выходные параметры 1-й стадии:

- Q^{Σ} - суммарное значение поглощенной дозы;
- M_{h0}' - вязкость по Муни бутилрегенерата после облучения;
- M_{v0}' - молекулярная масса бутилрегенерата после облучения;
- S_0' - значение концентрации поперечных связей бутилрегенерата после облучения;
- ϵ_0' - остаточное относительное удлинение бутилрегенерата после облучения;
- σ_0' - остаточная прочность на разрыв бутилрегенерата после облучения;
- T_0' - температура бутилрегенерата после облучения.

На 2-й стадии механообработки, кроме выходных параметров 1-й стадии, входными параметрами являются:

- T^Z – оптимальная температура обработки;
- N^Z – оптимальная частота вращений шнека экструдера.

К выходным параметрам 2-й стадии относят:

- M_h – конечная вязкость по Муни;
- M_v – конечное значение средневязкостной молекулярной массы;
- S – конечное значение концентрации поперечных связей;
- ε – значение относительного удлинения;
- σ – прочность на разрыв.

Принимая во внимание специфику и особенности поведения процесса, предложен способ управления его стадиями, при котором используется комбинация управляющих воздействий, что позволит одновременно повысить глубину деструкции полимерного материала и существенно снизить энергозатраты на проведение процесса.

Для реализации способа комбинирования факторов деструкции необходимо определить оптимальное количественное соотношение между величинами управляющих воздействий перед их подачей на регулирующие устройства контуров управления АСУ.

Решение этой задачи осуществлено с использованием разработанных математических описаний стадий процесса, являющихся одним из основных элементов алгоритмического обеспечения системы поддержки принятия решений. СППР как структурный элемент АСУ вырабатывает величины задающих воздействий для:

- устройства управления интенсивностью ионизационного облучения;
- регуляторов температуры и частоты вращения вала электродвигателя шнека экструдера.

Одним из основных результатов проведения процедур системного анализа исследуемого процесса явился выбор способа управления. Проектируемая автоматизированная система реализована в рамках концепции программного управления на основе математического и алгоритмического обеспечения СППР [19-22].

Синтез математического обеспечения СППР

Выполнив композицию всех решаемых в процессе выработки управляющих воздействий задач, предложена структура математического обеспечения СППР, которая представлена на рис. 2.

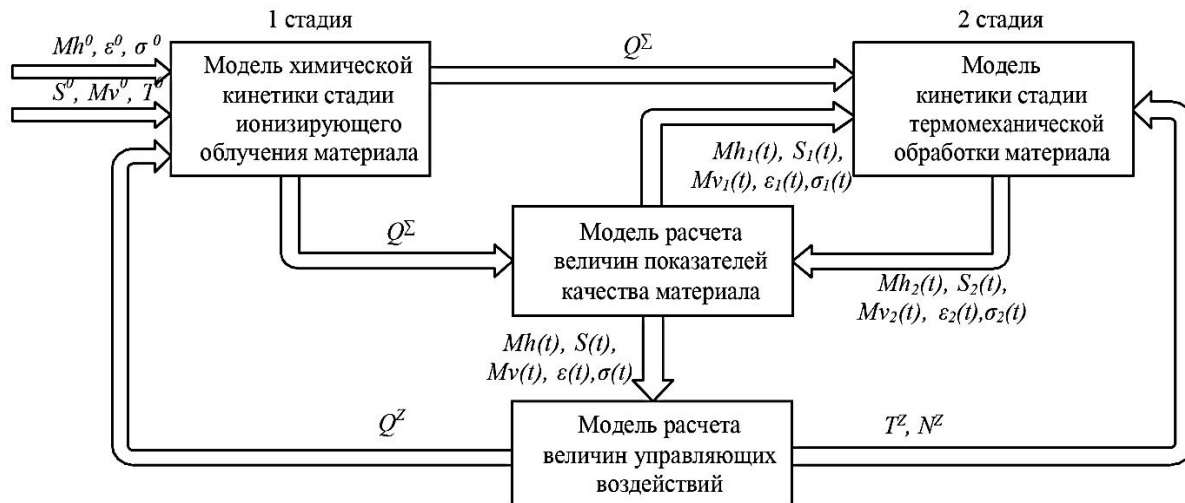


Рис. 2. Структура математического обеспечения СППР процесса синтеза бутилрегенерата

- $M_{h1}(t)$ – значение вязкости по Муни регенерата после облучения;
- $S_1(t)$ – значение концентрации поперечных связей после облучения;
- $M_{v1}(t)$ – значение средневязкостной молекулярной массы после облучения;
- $M_{h2}(t)$ – значение вязкости по Муни после термомеханической обработки;
- $S_2(t)$ – значение концентрации поперечных связей после термомеханической обработки;

- $M_{v2}(t)$ – значение средневязкостной массы после термомеханической обработки;
- $M_h(t)$ – текущее значение вязкости по Муни в процессе облучения;
- $S(t)$ – текущее значение концентрации поперечных связей после облучения;
- $M_v(t)$ – текущее значение средневязкостной массы материала после облучения.

Синтез алгоритмического обеспечения СППР

Анализ полученных зависимостей вязкости по Муни и параметров молекулярной структуры бутилрегенерата от величины поглощенной дозы (θ), продолжительности (t) и условий термомеханообработки (T) показал, что получение заданных значений показателей качества и характеристик пространственной структуры полимерной матрицы невозможно при одних и тех же значениях величин управляющих воздействий вектора $x = (\theta, T, t)$. Решение проблемы сводится к выработке обобщенного критерия, объединяющего частные критерии и учитывающего их влияние на всех стадиях производственного цикла. При этом необходимо учитывать, что частные критерии носят неравнозначный по важности характер.

Для решения данной проблемы поставлены и решены следующие задачи:

- сформированы частные критерии поиска значений оптимальных режимных параметров стадий радиационной и термомеханической обработки

$$z_1 = \left(\frac{M_v(0) - M_v(x)}{M_v(0)} \right)^2 \xrightarrow{x} \min \quad (1)$$

$$z_2 = \left(\frac{S(0) - S(x)}{S(0)} \right)^2 \xrightarrow{x} \max \quad (2)$$

$$z_3 = \left(\frac{M_{hz} - M_h(x)}{M_h^{norm}} \right)^2 \xrightarrow{x} \min \quad (3)$$

$$M_h^{norm} = \max(M_{hz}, M_h(x)) \quad , \quad (4)$$

где $S(0)$, $S(x)$ - начальная и текущая концентрации поперечных связей в полимерной матрице; $M_v(0)$, $M_v(x)$ - начальное и текущее значение средневязкостной молекулярной массы; M_{hz} - заданное значение вязкости по Муни;

- выявлены связи и конкурирующие отношения между частными и общим критериями оптимизации (рис. 3);

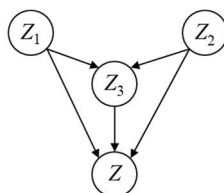


Рис. 3. Ориентированный граф связей и отношений между частными и общим критериями оптимизации

- выработан обобщенный критерий, объединяющий частные критерии и учитывающий их влияние на всех стадиях процесса:

$$Z = \sum_{i=1}^n y_i \cdot (\mu(A_i) - \mu(A_{i-1})), \quad (5)$$

где A_i - подмножества множества $Z: \{\emptyset; z_1; z_2; z_3;$

$z_1z_2; z_1z_3; z_2z_3; z_1z_2z_3\}$ трех взаимодействующих между собой критериев $z_1(x)$, $z_2(x)$, $z_3(x)$, которые при некоторых параметрах вектора x принимают значения y_1, y_2, y_3 ; $\mu(A_i)$ - нечеткая мера. Агрегирование обобщенного критерия производилось с применением математического аппарата интеграла Шоке в совокупности с вектором значений нечеткой меры Сугено;

- проведены вычислительные эксперименты и определены оптимальные значения вектора управляющих параметров процесса на основе математических моделей отдельных стадий процесса.

Конечные показатели качества бутилрегенерата, полученные в результате моделирования процесса при найденных числовых комбинациях параметров вектора x , представлены в таблице.

Конечные показатели качества бутилрегенерата

M_{hz} у.е.	Технологические параметры		Показатели качества бутилрегенерата		
			$M_h(t)$	$M_v(t)$	$S(t)$
45	θ , кГр	99,36	45,62	55 750	$8,46 \cdot 10^{-6}$
	T , К	373			
	t , мин	5			
50	θ , кГр	92,92	50,73	57 010	$9,37 \cdot 10^{-6}$
	T , К	373			
	t , мин	5			
55	θ , кГр	87,09	55,85	58 132	$1,03 \cdot 10^{-5}$
	T , К	373			
	t , мин	5			
60	θ , кГр	81,77	60,97	59 144	$1,12 \cdot 10^{-5}$
	T , К	373			
	t , мин	5			
65	θ , кГр	76,89	66,10	60 060	$1,21 \cdot 10^{-5}$
	T , К	373			
	t , мин	5			

Сравнение полученных в результате вычислительных экспериментов комбинаций величин управляющих воздействий вектора x показало, что для обеспечения более глубокой трансформации полимерной матрицы необходимо увеличивать дозу ионизационного облучения относительно значения, что позволит получать бутилрегенерат с заданными показателями качества при минимально возможных значениях параметров, характеризующих продолжительность и температурный режим термомеханической обработки.

Разработка алгоритма управления процессом

В соответствии с технологическими этапами производства и созданным алгоритмиче-

ским обеспечением системы поддержки принятия решений, разработан алгоритм управления процессом, который включает в себя следующую последовательность технологических, вычислительных и логических операций:

1. Ввод начальных значений: свойств сырья, технологических параметров процесса и параметров модулей математического описания физико-химических процессов.

2. Формирование вектора величин задающих воздействий – параметров, являющихся требуемыми показателями качества готового продукта.

3. Расчет оптимальных значений вектора управляющих воздействий на основе разработанного алгоритмического обеспечения системы поддержки принятия решений.

4. Загрузка бутылкаучука в ускоритель электронов.

5. Оценка значений $M_h(t)$, $S(t)$, $M_v(t)$, $\varepsilon(t)$, $\sigma(t)$ в процессе радиационно-химического разрушения полимерных связей.

6. Процесс, описанный в п. 5, протекает до достижения заданного суммарного значения поглощенной дозы $Q(t) = Q_z$, значение которого рассчитано на основе алгоритмического обеспечения системы поддержки принятия решений (п. 3).

7. Запуск электродвигателей ленточного транспортера и загрузка бутылкаучука в экструдер.

8. Запуск электродвигателя шнека экструдера.

9. Создание в экструдере необходимого температурного и механического режимов обработки полимерной композиции.

10. Расчет количества временных итераций n , на которое разбивается время протекания стадии термомеханической обработки изделия.

11. Оценка значений $M_h(t)$, $S(t)$, $M_v(t)$, $\varepsilon(t)$, $\sigma(t)$ в процессе обработки регенерата в экструдере.

12. Процесс, описанный в п.12, протекает на протяжении временного интервала t , значение которого рассчитано на основе алгоритмического обеспечения системы поддержки принятия решений (п. 3).

13. Завершение процесса синтеза бутилрегенерата и вывод параметров готового продукта.

Укрупненная блок-схема алгоритма управления двухстадийным процессом синтеза бутилрегенерата представлена на рис. 4.

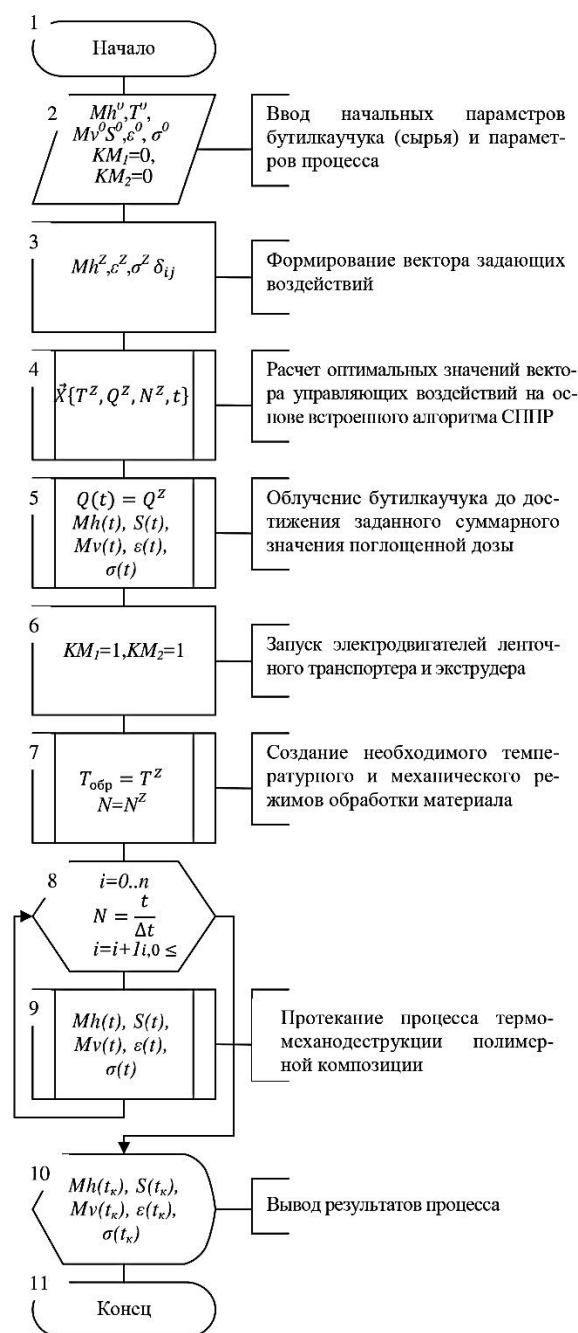


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления процессом синтеза бутилрегенерата:

- KM_1 - состояние электродвигателя ленточного транспортера;
- KM_2 - состояние электродвигателя экструдера

Выводы

Выполнен системный анализ основных стадий процесса как объекта управления, результаты которого в совокупности с результатами моделирования стадий технологического процесса позволили выявить физические величины, оказывающие непосредственное влияние на скорость протекания процесса и динамику изменения показателей качества продукта.

Предложен способ управления производственным процессом, для реализации которого использован метод программного управления на основе системы поддержки принятия решений.

Результаты параметрической идентификации моделей стадий процесса, математического моделирования динамики физико-химических превращений и системного анализа технологического процесса являются основой структуры математического обеспечения системы поддержки принятия решений. Предложенная структура обеспечивает замкнутость и связанность систем дифференциальных уравнений макрокинетики с функциональными зависимостями, описывающими трансформацию вязкопластических свойств в процессе разрушения основных и поперечных полимерных связей.

Разработано алгоритмическое обеспечение СППР системы управления процессом производства бутилового регенерата. Синтезированы модели и алгоритм поддержки принятия решений. Осуществлена программная реализация расчета оптимальных управляющих параметров с использованием дискретного интеграла Шоке, нечеткой меры Сугено и генетического алгоритма.

Создан алгоритм управления технологическим процессом, позволяющий на основе системы поддержки принятия решений осуществлять программное управление режимными параметрами процесса для получения бутилрегенерата с заданными показателями качества.

Литература

1. Догадкин Б.А., Донцов А.А., Шершнев В.А. Химия эластомеров. М.: Химия, 1981. 374 с.
2. Барамбойм Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений. М.: Химия, 1978. 384 с.
3. Казале А., Портер Р. Реакции полимеров под действием напряжений. Л.: Химия, 1983. 440 с.
4. Бугаенко Л.Т., Кузьмин М.Г., Полак Л.С. Химия высоких энергий. М.: Химия, 1988. 368 с.
5. Исследование и моделирование процесса деструкции полимера в массе / С.Г. Тихомиров, С.Л. Подвальный, А.А. Хвостов, О.В. Карманова, В.К. Битюков // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. № 6. С. 83-92.
6. Разгон Л.Р., Дроздовский В.Ф. О взаимодействии полимерных радикалов, образующихся при механической деструкции вулканизатов с акцепторами радикалов // Высокомолекулярные соединения. 1970. Т. 7. № 5. С. 1538-1543.
7. Шутилин Ю.Ф., Карманова О.В. Некоторые особенности деструкции и сшивания полидиенов // Каучук и резина. 2012. №2. С.19-21.
8. Assessment on radiochemical recycling of butyl rubber / T. Zaharescu, C. Cazac, S. Jipa, R. Setnescu // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Elsevier. 2001. No. B 185. Pp. 360-364.
9. Obtaining and using of reclaimed butyl rubber with the use of ionizing radiation / O.V. Karmanova, S.G. Tikhomirov, S.N. Kayushnikov, etc. // Radiation Physics and Chemistry. 2019. V. 159. Pp. 154-158.
10. Recycling of gamma irradiated inner tubes in butyl based rubber compounds / B. Karaagaç, M. Şen, V. Deniz, O. Güven // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Elsevier. 2007. No. B 265. Pp. 290-293.
11. Radiation degradation of spent butyl rubbers / A.V. Telnov, N.V. Zavyalov, Yu.A. Khokhlov, N.P. Sitnikov, etc. // Radiation Physics and Chemistry. Pergamon. 2002. No. 63. Pp. 245-248.
12. Оценка влияния ионизирующих излучений на вязкоупругие свойства вулканизатов бутилкаучука / С.Л. Подвальный, С.Г. Тихомиров, О.В. Карманова, А.А. Хвостов, А.В. Карманов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83. №9. С. 1232-1234.
13. Моделирование кинетики термомеханической деструкции аморфных каучуков / С.Г. Тихомиров, О.В. Карманова, И.А. Хаустов, А.А. Хвостов и др. // Каучук и резина. 2018. Т. 77. № 4. С. 256-259.
14. Research into kinetics of radiation destruction of elastomers / S.G. Tikhomirov, O.V. Karmanova, S.L. Podvalny, A.A. Khvostov, A.V. Karmanov // Advanced Materials & Technologies. 2018. No. 2. Pp. 9-17.
15. Mathematical modeling of the thermomechanical destruction process of elastomers treated with ionizing radiation / A.K. Pogodaev, S.G. Tikhomirov, O.V. Karmanova, S.L. Podvalny, A.A. Khvostov, A.V. Karmanov // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2019. Vol. 54. No. 5. Pp. 902-908.
16. Modeling of the destruction process of butyl rubbers / S.G. Tikhomirov, P.S. Polevoy, M.E. Semenov, A.V. Karmanov // Radiation Physics and Chemistry. 2019. Vol. 158. Pp. 205-208.
17. Санников А.А., Куцубина Н.В. Системный анализ при принятии решений. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. 137 с.
18. The information system of evolution control of multistage processes of production and technical systems in fuzzy dynamic environments / B.V. Paluh, A.N. Vetrov, I.A. Egereva, Yu.G. Kozlova // Open semantic technologies for the design of intelligent systems. 2017. No 7. Pp. 301-304.
19. Holkar K.S., Waghmare L.M. An Overview of Model Predictive Control // International Journal of Control and Automation. 2010. Vol. 3. No 4. Pp. 47-63.
20. Шариков Ю.В., Шариков Ф.Ю. Системы управления с использованием математических моделей технологических объектов в контуре управления. Автоматизация технологических процессов // MathDesigner. 2016. № 1. С. 4-8.
21. Подвальный С.Л., Барабанов А.В. Модульная структура системы многоальтернативного моделирования процессов полимеризации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т.9. № 5.1. С.41-43
22. Вент Д.П., Лопатин А.Г., Брыков Б.А. Сравнительный анализ различных методов управления химическим реактором синтеза полимеров // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. 2019. Т. 21. С. 55-67.

Поступила 02.11.2020; принята к публикации 18.12.2020

Информация об авторах

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел. +7 (929) 011-21-53

Попов Алексей Петрович – канд. техн. наук, доцент, начальник управления информационных технологий, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: aleksej_p_91@mail.ru, тел. +7 (473) 255-38-56

Карманов Андрей Викторович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: andrikar93@yandex.ru, тел. +7 (920) 414-39-29

Тихомиров Герман Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: tgs.game@bk.ru, тел. +7 (915) 584-75-12

Образцов Николай Константинович – магистрант, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: kola.l@bk.ru, тел. +7 (920) 214-84-74

**SYNTHESIS OF A CONTROL SYSTEM FOR THE DESTRUCTION PROCESS
OF CROSS-LINKED POLYMERS UNDER COMBINED EXTERNAL ACTIONS**

S.L. Podvalny¹, A.P. Popov², A.V. Karmanov¹, G.S. Tikhomirov³, N.K. Obraztsov²

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

²**Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia**

³**Voronezh State University, Voronezh, Russia**

Abstract: previous scientific research in the field of radiation destruction of spent polymer materials, waste and industrial rubber goods, as well as their thermomechanical processing, is not sufficient for designing and automation of production lines of low molecular weight polymers using radiation processing on an industrial scale. This paper presents the results of the development of a decision support system for the process of controlled destruction of resin butyl rubber vulcanizates under the combined actions of radiation and thermal mechanical treatment. The developed system is the main functional element of the synthesized control system. Control parameters for the butyl rubber vulcanizates destruction process were determined. A system analysis of the reclaimed butyl rubber production process as a control object was carried out. A method for controlling the stages of a technological process is proposed, in which a combination of control actions is used. The synthesis of the structure of the mathematical support for the decision support system was completed. Particular search criteria for optimal parameters were formed, the structure of connections between them was established, and a method for aggregating a generalized criterion was selected. Using a fuzzy Choquet integral and a fuzzy Sugeno measure, an algorithm for estimating the optimal process parameters was developed. The search problem for the optimal parameters was carried out using a genetic algorithm. The results of computational experiments of multicriteria optimization of technological parameters were obtained. An algorithm for controlling the destruction process with combined control actions was developed

Key words: destruction, ionization radiation, mechanical treatment, mathematical model, process control, decision support system

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the grant of the program "U.M.N.I.K-2018" no. 14279GU/2019, 10.07.2019

References

1. Dogadkin B.A., Dontsov A.A., Shershnev V.A. "Chemistry of elastomers" ("Khimiya elastomerov"), Moscow, Khimiya, 1981, 374 p.
2. Baramboim N.K. "Mechanical chemistry of macromolecular compounds" ("Mekhanokhimiya vysokomolekulyarnykh soedineniy"), Moscow, Khimiya, 1978, 384 p.
3. Casale A., Porter R. "Reactions of polymers under the action of stresses" ("Reaktsii polimerov pod deystviem napryazheniy"), Leningrad, Khimiya, 1983, 440 p.
4. Bugaenko L.T., Kuz'min M.G., Polak L.S. "Chemistry of high energies" ("Khimiya vysokikh energiy"), Moscow, Khimiya, 1988, 368 p.
5. Tikhomirov S.G., Podvalny S.L., Khvostov A.A., Karmanova O.V., Bityukov V.K. "Investigation and modeling of the process of polymer destruction in bulk", *Theoretical Foundations of Chemical Technology (Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii)*, 2018, vol. 52, no. 6, pp. 83-92.
6. Razgon L.R., Drozdovskiy V.F. "On the interaction of polymeric radicals formed during mechanical destruction of vulcanizates with radical acceptors", *High-Molecular Compounds (Vysokomolekulyarnye soedineniya)*, 1970, vol. 7, no. 5, pp. 1538-1543.
7. Shutilin Yu.F., Karmanova O.V. "Some features of destruction and cross-linking of polydienes", *Caoutchouc and Rubber (Kauchuk i rezina)*, 2012, no. 2, pp. 19-21.
8. Zaharescu T., Cazac C., Jipa S., Setnescu R. "Assessment on radiochemical recycling of butyl rubber", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Elsevier, 2001, no. B 185, pp. 360-364.
9. Karmanova O.V., Tikhomirov S.G., Kayushnikov S.N., et al. "Obtaining and using of reclaimed butyl rubber with the use of ionizing radiation", *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, vol. 159, pp. 154-158.

10. Karaağaç B., Şen M., Deniz V., Güven O. "Recycling of gamma irradiated inner tubes in butyl based rubber compounds", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Elsevier, 2007, no. B 265, pp. 290-293.
11. Telnov A.V., Zavyalov N.V., Khokhlov Yu.A., Sitnikov N.P., et al. "Radiation degradation of spent butyl rubbers", *Radiation Physics and Chemistry*, Pergamon, 2002, no. 63, pp. 245-248.
12. Podvalny S.L., Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Khvostov A.A., Karmanov A.V. "Assessment of the influence of ionizing radiation on the viscoelastic properties of butyl rubber vulcanizates", *News of Russian Academy of Sciences (Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk)*, 2019, vol. 83, no. 9, pp. 1232-1234.
13. Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Khaustov I.A., Khvostov A.A., et al. "Modeling the kinetics of thermomechanical destruction of amorphous rubbers", *Caoutchouc and Rubber (Kauchuk i rezina)*, 2018, vol. 77, no. 4, pp. 256-259.
14. Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Podvalny S.L., Khvostov A.A., Karmanov A.V. "Research into kinetics of radiation destruction of elastomers", *Advanced Materials & Technologies*, 2018, no. 2, pp. 9-17.
15. Pogodaev A.K., Tikhomirov S.G., Karmanova O.V., Podvalny S.L., Khvostov A.A., Karmanov A.V. "Mathematical modeling of the thermomechanical destruction process of elastomers treated with ionizing radiation", *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2019, vol. 54, no. 5, pp. 902-908.
16. Tikhomirov S.G., Polevoy P.S., Semenov M.E., Karmanov A.V. "Modeling of the destruction process of butyl rubbers", *Radiation Physics and Chemistry*, 2019, vol. 158, pp. 205-208.
17. Sannikov A.A., Kutsubina N.V. "System analysis when making decisions" ("Sistemnyy analiz pri prinyatii resheniy"), Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University, 2015, 137 p.
18. Paluh B.V., Vetrov A.N., Egereva I.A., Kozlova Yu.G. "The information system of evolution control of multistage processes of production and technical systems in fuzzy dynamic environments", *Open Semantic Technologies for the Design of Intelligent Systems*, 2017, no. 7, pp. 301-304.
19. Holkar K.S., Waghmare L.M. "An overview of model predictive control", *International Journal of Control and Automation*, 2010, vol. 3, no.4, pp. 47-63.
20. Sharikov Yu.V., F.Yu. Sharikov "Control systems using mathematical models of technological objects in the control loop. Automation of technological processes", *MathDesigner*, 2016, no. 1, pp. 4-8.
21. Podvalny S.L., Barabanov A.V. "Modular structure system of multy-alternative polymerization process modeling", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol.9, no.5-1, pp.41-43
22. Vent D.P., Lopatin A.G., Brykov B.A. "Comparative analysis of various control methods for a chemical reactor of polymer synthesis", *Bulletin of International Academy of Systems Research (Vestnik Mezhdunarodnoy akademii sistemnykh issledovaniy)*, 2019, vol. 21, pp. 55-67.

Submitted 02.11.2020; revised 18.12.2020

Information about the authors

Semyen L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel. +7 (929) 011-21-53

Aleksey Popov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies of Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii prospekt, Voronezh 394036, Russia), e-mail: aleksej_p_91@mail.ru, tel. +7 (473) 255-38-56

Andrey V. Karmanov, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: andrikar93@yandex.ru, tel. +7 (920) 414-39-29

German S. Tikhomirov, Graduate student, Voronezh State University (1 Universitetskaya square, Voronezh 394018, Russia), e-mail: tgs.game@bk.ru, tel. +7 (915) 584-75-12

Nikolay K. Obraztsov, MA, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii prospekt, Voronezh 394036, Russia), e-mail: kola.l@bk.ru, tel. +7 (920) 214-84-74

Радиотехника и связь

DOI 10.36622/VSTU.2020.16.6.007

УДК 621.396.67

АНТЕННАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ПЛОСКОЙ ЛИНЗЫ ЛЮНЕБЕРГА СО СКВОЗНЫМИ КРУГЛЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ И ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕМ-РУПОРА

А.В. Ашихмин¹, Ю.Г. Пастернак^{1,2}, В.А. Пендюрин³, Ф.С. Сафонов²

¹ЗАО «ИРКОС», г. Москва, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

³АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия

Аннотация: характерной чертой последних пятидесяти лет было особое стремление к постоянно растущей скорости передачи в сетях беспроводной связи. С появлением Интернета, а именно технологии (IoT), значительные усилия в сфере исследований вкладываются в беспроводные сети, требующие высокой скорости передачи и большой пропускной способности. Рассмотрена линза Люнеберга, спроектированная на заземляющей системе при помощи технологии изготовления круглых отверстий, сверху расположена диэлектрическая пластина с системой круглых отверстий, формирующая необходимый закон изменения эффективного коэффициента преломления от радиуса (материал - Rogers 5880, толщина - 0.508 мм, $\varepsilon_r = 2.2$). Особенностью данной конструкции являются сквозные круглые отверстия в плоской линзе Люнеберга. Минимальный диаметр отверстия – 0.4 мм; максимальный – 2.6 мм. Минимальная ширина перегородки между отверстиями – около 0.3 мм. Всего – 1295 отверстий (диаметры - 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6 мм). Показано несколько вариантов реализации данной линзы. Рассмотрено несколько вариантов того, какими должны быть отверстия в теле линзы для предпочтительного режима работы, сделаны выводы о каждом. При помощи математического, численного анализа исследована разница в случаях наличия или отсутствия «крышек» у «чашек», образующих ТЕМ-рупор в виде фигуры вращения

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

Введение

Характерной чертой последних пятидесяти лет было стремление к постоянно растущей скорости передачи в сетях беспроводной связи. С появлением Интернета, а именно технологии (IoT), значительные усилия в сфере исследований вкладываются в беспроводные сети, требующие высокую скорость передачи и большую пропускную способность. Современные приложения, обладающие высокой скоростью приема/передачи, позволяют воспроизводить потоковое видео сверхвысокой четкости, а также способны реализовать виртуальную и дополненную реальность [1, 2]. Такие приложения работают на частотах ≈ 60 Гц. Этот диапазон хорошо подходит для работы со стандартами IEEE (802.15.3, 802.11 ad [3]), которые, в свою очередь, совместимы для работы с сетями 5G. Еще одним критерием технологии 5G является возможность обслуживания большого количества пользователей, причем некоторые приложения, технологии IoT, имеют такую возможность без строгого

требования к скорости передачи данных.

Различные технологии беспроводных сетей для достижения общих целей объединяются воедино [4]. Например, где плотность базовых станций увеличивается, используют технологию Small cell (малые соты), узлы сотового радиодоступа с низким энергопотреблением, имеющие диапазон распространения от 10 метров до нескольких километров. Для достижения требуемого значения скорости передачи данных используют технологию кооперативных коммуникаций, где уровень помех уменьшается за счет регулирования уровня связи между узлами станций. Также методами технологии беспроводных сетей являются агрегирование несущих, где объединяется полоса пропускания от разрозненных каналов, и гетерогенные сети, где используются несколько сетей, работающих на разных частотах и с различными модуляциями. Одной из ключевых технологий является метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, в котором передача данных и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн (M-MIMO), где количество антенн увеличивается [5-7].

Одним из ключевых подходов для реализации принципов работы беспроводных сетей является использование ранее неиспользуемых полос электромагнитного спектра в более высоких частотных диапазонах, в частности в миллиметровом (мм) и терагерцовом (ТГц) диапазонах. В настоящее время беспроводные сети преимущественно работают на частотах от 0,1 до 10 ГГц, так как в этом диапазоне существуют ключевые преимущества для широкополосных устройств, а именно: простота изготовления и простота модуляции сигнала по сравнению с другими. На более высоких частотах увеличиваются потери распространения электроэнергии и размеры устройств должны быть сильно меньше, из-за этого увеличивается сложность изготовления. Все эти проблемы на данный момент решаются. Кроме того, переход на мм-волну также включает в себя изменение директивной связи, а не вещания, что создает новые проблемы [8, 9] в рамках будущих беспроводных сетей. Для использования сотовой связи в городских условиях используются частоты мм-волн ≈ 28 ГГц – 37 ГГц [10-13], причем диапазон 25-40 ГГц используется Федеральной комиссией по связи в США [14], в то время как частота от 55 до 100 ГГц может быть использована для принципа 5G сети [13, 15-17].

Трансформационный электромагнетизм – это быстро развивающаяся технология, которая обеспечивает повышенный контроль электромагнитных волн за счет контроля пространственного изменения свойств материала [18, 19]. Одной из областей, которая привлекла большое внимание, является использование трансформационного электромагнетизма для изменения формы (квази) оптического устройства (линзы или отражателя) с сохранением при этом электромагнитных характеристик путем изменения диэлектрической проницаемости. Одним из примеров является линза Люнеберга [20]. Линза Люнеберга (ЛЛ) представляет собой сферическую линзу с непрерывно изменяющимся показателем преломления, так что она имеет относительную диэлектрическую проницаемость ≈ 2 в центре и 1 на внешней поверхности (поскольку относительная проницаемость равна единице на интересующих частотах) [21]. В практической реализации непрерывная вариация аппроксимируется дискретными оболочками с различными диэлектрическими проницаемостями. Ключевая особенность ЛЛ заключается в том, что точечный источник, расположенный на поверхности, создает коллимированный луч с другой стороны линзы.

В этой работе рассмотрена линза Люнеберга, спроектированная на заземляющей системе при помощи технологии изготовления круглых отверстий в теле линзы. Показаны несколько вариантов реализации данной линзы. Рассмотрены несколько вариантов того, какими должны быть отверстия в теле линзы для предпочтительного режима работы, сделаны выводы о каждом. При помощи математического, численного анализа исследована разница в случаях наличия или отсутствия «крышек» у «чашек», образующих ТЕМ-рупор в виде фигуры вращения.

Моделирование антенной системы, конструкция линзы Люнеберга

Перечислим основные критерии, учитываемые при разработке многолучевой антенной системы:

- возможность формирования 8 лепестков в азимутальном секторе шириной 90° в полосе частот от 8 до 18 ГГц, поляризация – вертикальная;
- ширина лепестков в азимутальной плоскости по уровню -3 дБ – не менее 11° ;
- ширина лепестков в угло-местной плоскости – не менее 30° ;
- вид управления диаграммой направленности – коммутационное сканирование;
- возможность реализации моноимпульсного пеленгования;
- простота конструкции и технологии изготовления;
- минимизация массы и габаритных размеров.

При проектировании замедляющей системы, реализующей плоскую линзу Люнеберга с оболочкой, коэффициент преломления оболочки 1.1 (рис. 1), использовался наиболее простой вид технологии – изготовление системы круглых отверстий.

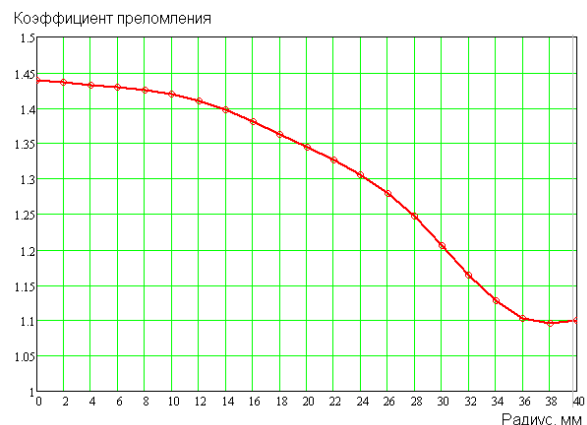


Рис. 1. Зависимость эффективного коэффициента преломления от радиуса в линзе Люнеберга с оболочкой

Конструкция антенной системы представлена в виде ТЕМ-рупора в виде двух «чашек», между днищами которых размещена замедляющая структура, возбуждающаяся с помощью системы полосковых симметрирующих и согласующих трансформаторов рис. 2(а). На рис. 2(б) снята верхняя «чашка» ТЕМ-рупора, сверху расположена диэлектрическая пластина с системой круглых отверстий, формирующая необходимый закон изменения эффективного коэффициента преломления от радиуса (материал - Rogers 5880, толщина - 0.508 мм, $\epsilon_r = 2.2$). Особенностью данной конструкции является сквозные круглые отверстия в плоской линзе Люнеберга. Минимальный диаметр отверстия – 0.4 мм; максимальный – 2.6 мм. Минимальная ширина перегородки между отверстиями – около 0.3 мм. Всего – 1295 отверстий (диаметры - 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6 мм).

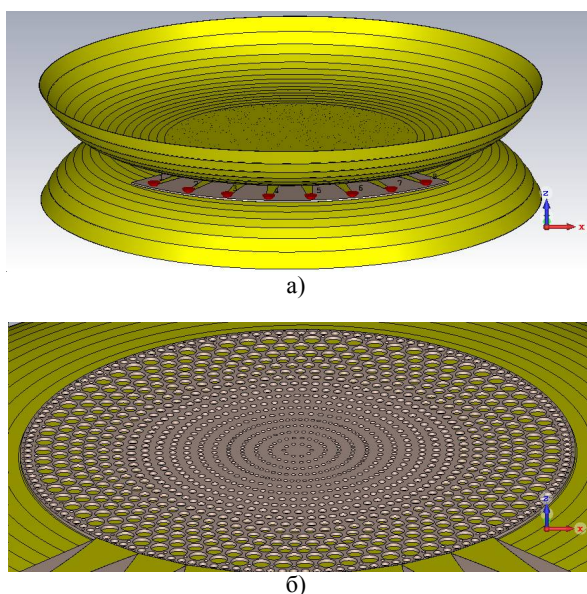


Рис. 2. Конструкция антенной системы в виде ТЕМ-рупора:

- а) внешний вид антенной системы
б) внешний вид антенной системы без верхней «чашки»

Входные характеристики фазированной антенной решетки (ФАР), а именно: частотные зависимости модулей S параметров, номограммы Смита и коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) при запитке 1-4 портов, показаны на рис. 3.

В низкочастотной области рассматриваемого диапазона частот от 8 до 18 ГГц хорошее согласование портов достигается за счет увеличения взаимной связи между соседними портами, что приводит к снижению коэффициента полезного действия, что подтверждается рис. 4.

На рис. 4 показаны потери в материалах (дБ) - верхнее семейство кривых, и суммарные потери с учетом потерь в балластах и рассогласования портов - нижнее семейство кривых, при запитке 1-4 портов.

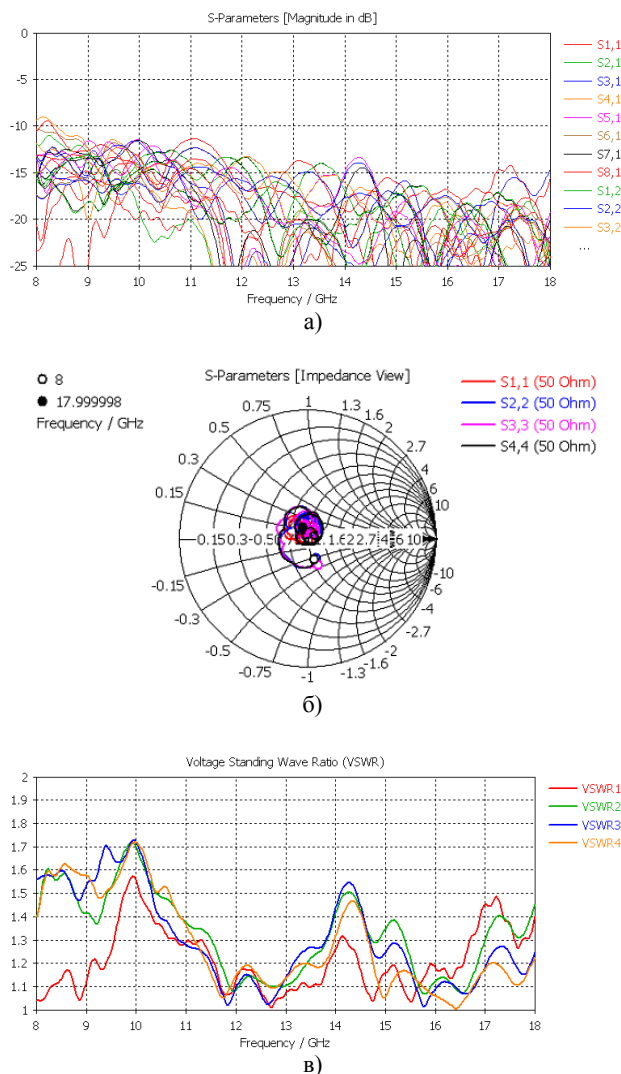


Рис. 3. Входные характеристики ФАР при запитке 1-4 портов:

- а) частотные зависимости модулей S – параметров при запитке 1-4 портов
б) номограммы Смита для 1-4 портов
в) КСВН при запитке 1-4 портов

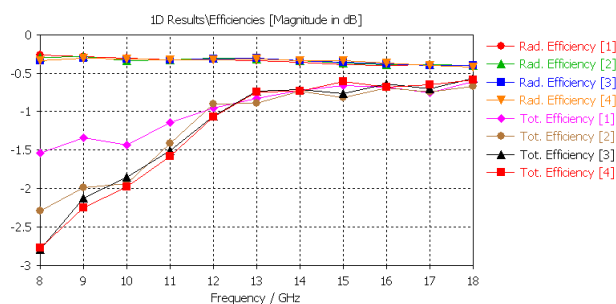


Рис. 4. Потери в материалах, дБ

На рис. 5 и 6, соответственно, показаны диаграммы направленности антенной системы в азимутальной и угло-местной плоскостях, для 1-4 портов. Из рис. 5 и 6 видно, что с ростом частоты имеет место тенденция выравнивания коэффициентов направленного действия для портов 1-4. Это можно объяснить уменьшением потерь мощности в соседних портах антенной системы вследствие увеличения роста развязки между портами с ростом частоты. Также можно отметить тенденцию к симметрированию диаграмм направленности в угло-местной плоскости с ростом частоты (рис. 6), что объясняется увеличением электрического размера расширяющихся полос симметрирующих и согласующих трансформаторов, рис. 2 (а).

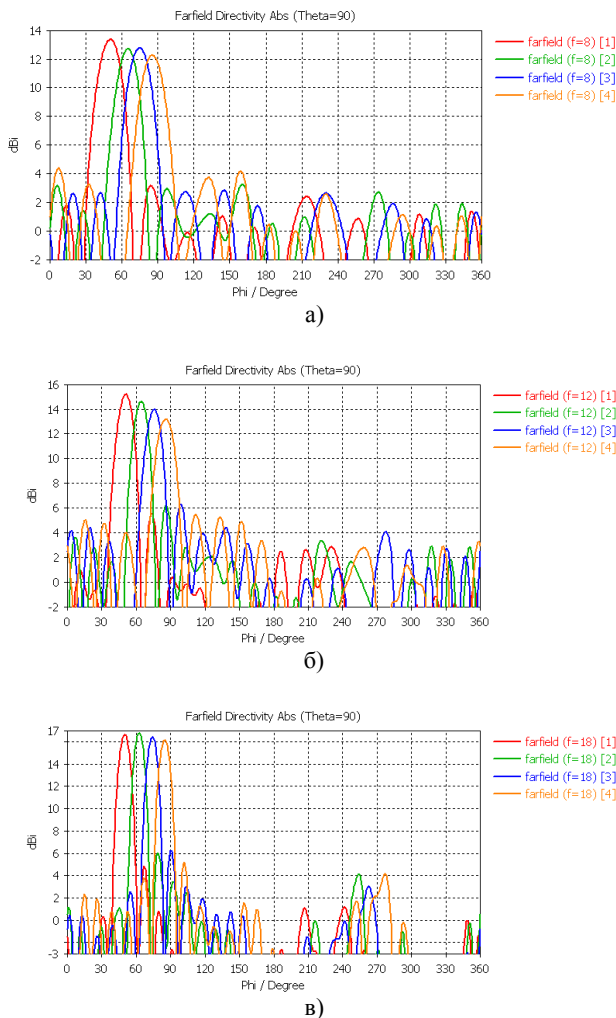


Рис. 5. ДН в азимутальной плоскости при запитке 1-4 портов (дБ):
а) $f=8$ ГГц
б) $f=12$ ГГц
в) $f=18$ ГГц

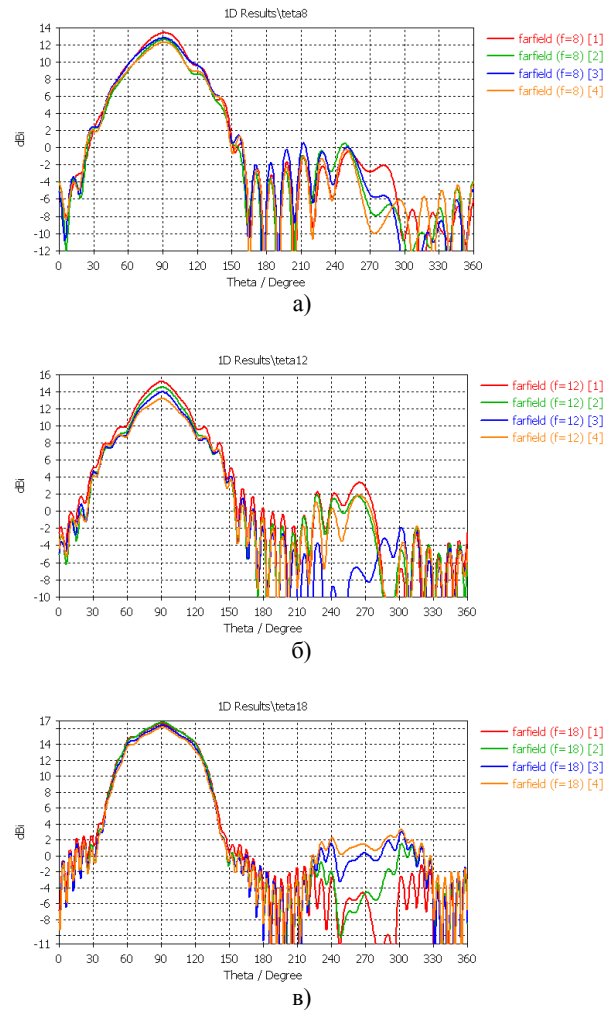


Рис. 6. ДН в угло-местной плоскости при запитке 1-4 портов (дБ):
а) $f=8$ ГГц
б) $f=12$ ГГц
в) $f=18$ ГГц

Заключение

Отметим следующие выводы, полученные в результате проведения исследований.

1. При использовании круглых сквозных отверстий для создания замедляющей структуры плоской линзы Лüneберга предпочтительным является реализация линзы с оболочкой, т.к. имеются ограничения на толщину перегородок между соседними отверстиями и отклонения от заданного закона изменения эффективного коэффициента преломления в линзе без оболочки приводит к росту боковых лепестков и уменьшению коэффициента направленного действия.

2. Ближе к периметру отверстия желательно располагать в шахматном порядке с включением отверстий меньшего диаметра между более крупными отверстиями.

3. Результаты численного анализа показали, что не наблюдается существенной разницы в случаях наличия или отсутствия «крышек» у «чашек», образующих ТЕМ-рупор в виде фигуры вращения. Конструкция с «крышками» является более жесткой.

4. Исследовались ТЕМ-рупоры с различным законом раскрытия: линейным, экспоненциальным и формой, определяемой квази-Чебышевским законом. Исследования показали, что наилучшими характеристиками по качеству согласования обладают ТЕМ-рупоры с экспоненциальной формой раскрытия. Вследствие уменьшения отражений в ТЕМ-рупорах с экспоненциальной формой раскрытия наблюдалось также уменьшение уровня боковых лепестков в азимутальной плоскости.

Литература

1. 60GHz ultrawideband polarimetric MIMO sensing for wireless multi-gigabit and radar / Ariza A.P.G., Muller R., Wollenschlaeger F. et al. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 4, pp. 1631–1641, 2013.
2. Cutting the cord in virtual reality / Abari O., Bharadia D., Duffield A., and Katabi D. // Proceedings of the 15th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, HotNets 2016, pp. 162–168, USA, November 2016.
3. ISO/IEC/IEEE International Standard for Information technology– Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks– Specific requirements–Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band (adoption of IEEE Std 802.11ad-2012), ISO/IEC/IEEE 8802-11:2012/Amd.3:2014(E), pp. 1–634, 2014.
4. The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G / Jungnickel V., Manolakis K., Zirwas W. et al. // IEEE Communications Magazine, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 44–51.
5. An overview of massive MIMO: benefits and challenges / Lu L., Li G.Y., Swindlehurst A.L., Ashikhmin A., and Zhang R. // IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 742–758.
6. Massive MIMO for next generation wireless systems / Larsson E.G., Edfors O., Tufvesson F., and Marzetta T.L. // IEEE Communications Magazine, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 186–195.
7. Stacked patch antenna with dual-polarization and low mutual coupling for massive MIMO / Gao Y., Ma R., Wang Y., Zhang Q., and Parini C. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, vol. 64, no. 10, pp. 4544–4549.
8. Scott-Hayward S. and Garcia-Palacios E. Multimedia resource allocation in mmwave 5G networks // IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 1, pp. 240–247, 2015.
9. IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz communication for multi-gigabit-per-second Wi-Fi / T. Nitsche, C. Cordeiro, A.B. Flores, E.W. Knightly, E. Perahia, and J. C. Widmer // IEEE Communications Magazine, 2014. vol. 52, no. 12, pp. 132–141.
10. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work! / T. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus et al. // IEEE Access, 2013, vol. 1, pp. 335–349.
11. Broadband millimeter-wave propagation measurements and models using adaptive-beam antennas for outdoor/Urban cellular communications / T.S. Rappaport, F. Gutierrez, E. Ben-Dor, J.N. Murdock, Y. Qiao, and J.I. Tamir // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 1850–1859.
12. Samimi M.K. and Rappaport T.S. 3-D Millimeter-Wave Statistical Channel Model for 5G Wireless System Design // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, vol. 64, no. 7, pp. 2207–2225.
13. Directional radio propagation path loss models for millimeter-wave wireless networks in the 28-, 60-, and 73-GHz bands / A.I. Sulyman, A. Alwarafy, G.R. MacCartney, T.S. Rappaport, and A. Alsanie // IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016. vol. 15, no. 10, pp. 6939–6947.
14. Notice of proposed rulemaking, Online, Federal Communications Commission, Oct. 23 2015, FCC-15-138 – including use of spectrum above 24GHz for mobile radio services. Available: <https://www.fcc.gov/document/fcc-promotes-higher-frequency-spectrum-future-wireless-technology-0>.
15. Kim J., Kwon S., and Choi G. Performance of video streaming in infrastructure-to-vehicle telematic platforms with 60-GHz radiation and IEEE 802.11ad baseband // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016. vol. 65, no. 12, pp. 10111–10115.
16. Va V., Choi J., and Heath R. The impact of beamwidth on temporal channel variation in vehicular channels and its implications // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016. vol. 66, no. 6, pp. 5014–5029.
17. Kumari P., Gonzalez-Prelcic N., and Heath R.W. Investigating the IEEE 802.11ad standard for millimeter wave automotive radar // in Proceedings of the 82nd IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2015, USA, September 2015.
18. Leonhardt U. Optical conformal mapping // American Association for the Advancement of Science. Science, 2006, vol. 312, no. 5781, pp. 1777–1780.
19. Pendry J.B., Schurig D., and Smith D.R. Controlling electromagnetic fields // American Association for the Advancement of Science. Science, 2006, vol. 312, no. 5781, pp. 1780–1782.
20. Luneberg R.K. Mathematical Theory of Optics, Brown University, Providence, RI, USA, 1944.
21. Schrank H. and Sanford J. A Luneberg-Lens Update // IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1995. vol. 37, no. 1, pp. 76–79.

Поступила 29.10.2020; принята к публикации 18.12.2020

Информация об авторах

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

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет

(394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84); ведущий инженер, ЗАО «ИРКОС» (129626, Россия, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternakug@mail.ru

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

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

ANTENNA SYSTEM BASED ON A FLAT LUNEBERG LENS WITH THROUGH ROUND HOLES AND AN AXISYMMETRIC TEM-HORN

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

¹JSC "IRKOS", Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

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

Abstract: a characteristic feature of the last fifty years has been the desire for ever-increasing transmission speeds in ubiquitous wireless communications. With the advent of the Internet, namely technology (IoT), significant research efforts are being invested in wireless networks that require high transmission speeds and increased bandwidth. In this paper, we consider a Luneberg lens designed on a grounding system using the technology of manufacturing round holes, with a dielectric plate with a system of round holes on top, forming the necessary law of change in the effective refractive index from the radius (material-Rogers 5880, thickness-0.508 mm). A special feature of this design is the through round holes in the flat Luneberg lens. The minimum hole diameter is 0.4 mm; the maximum one is 2.6 mm. The minimum width of the partition between the holes is about 0.3 mm. There are totally 1295 holes (diameters - 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6 mm). Several options for implementing this lens are shown. Several variants of what the holes in the lens body should be for the preferred mode of operation are also considered, and conclusions are drawn about each. Using mathematical and numerical analysis, the difference in the cases of the presence or absence of "lids" in the "cups" that form a TEM - horn in the form of a rotation figure is investigated

Key words: mathematical model, Luneberg lens, TEM-horn, directivity pattern

References

1. Ariza A.P.G., Muller R., Wollenschlager F. et al. "60GHz ultrawideband polarimetric MIMO sensing for wireless multi-gigabit and radar," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 1631–1641.
2. Abari O., Bharadia D., Duffield A., Katabi D. "Cutting the cord in virtual reality," *Proceedings of the 15th ACM Workshop on Hot Topics in Networks, HotNets 2016*, USA, November 2016, pp. 162–168.
3. ISO/IEC/IEEE International Standard for Information technology– Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks– Specific requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band (adoption of IEEE Std 802.11ad-2012), ISO/ IEC/IEEE 8802-11:2012/Amd.3:2014(E), 2014, pp. 1–634.
4. Jungnickel V., Manolakis K., Zirwas W. et al., "The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G," *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 44–51.
5. Lu L., Li G.Y., Swindlehurst A.L., Ashikhmin A., Zhang R. "An overview of massiveMIMO: benefits and challenges," *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2014, vol. 8, no. 5, pp. 742–758.
6. Larsson E.G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T.L. "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 186–195.
7. Gao Y., Ma R., Wang Y., Zhang Q., Parini C. "Stacked patch antenna with dual-polarization and low mutual coupling for massive MIMO," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 64, no. 10, pp. 4544–4549.
8. Scott-Hayward S., Garcia-Palacios E. "Multimedia resource allocation in mmwave 5G networks," *IEEE Communications Magazine*, 2015, vol. 53, no. 1, pp. 240–247.
9. Nitsche T., Cordeiro C., Flores A.B., Knightly E.W., Perahia E., Widmer J. C. "IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz communication for multi-gigabit-per-second Wi-Fi," *IEEE Communications Magazine*, 2014, vol. 52, no. 12, pp. 132–141.
10. Rappaport T., Sun S., Mayzus R. et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work!," *IEEE Access*, 2013, vol. 1, pp. 335–349.
11. Rappaport T.S., Gutierrez F., Ben-Dor E., Murdock J.N., Qiao Y., Tamir J.I. "Broadband millimeter-wave propagation measurements and models using adaptive-beam antennas for outdoor Urban cellular communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 1850–1859.
12. Samimi M.K., Rappaport T.S. "3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, vol. 64, no. 7, pp. 2207–2225.
13. Sulyman A.I., Alwarafy A., MacCartney G.R., Rappaport T.S., Alsanie A. "Directional radio propagation path loss models for millimeter-wave wireless networks in the 28-, 60-, and 73- GHz bands," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, vol. 15, no. 10, pp. 6939–6947.

14. Notice of proposed rulemaking, Online, Federal Communications Commission, Oct. 23 2015, FCC-15-138 – including use of spectrum above 24GHz for mobile radio services, available at: <https://www.fcc.gov/document/fcc-promotes-higher-frequency-spectrum-future-wireless-technology-0>.
15. Kim J., Kwon S., Choi G. "Performance of video streaming in infrastructure-to-vehicle telematic platforms with 60-GHz radiation and IEEE 802.11ad baseband," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, vol. 65, no. 12, pp. 10111–10115.
16. Va V., Choi J., Heath R. "The impact of beamwidth on temporal channel variation in vehicular channels and its implications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, vol. 66, no. 6, pp. 5014–5029.
17. Kumari P., Gonzalez-Prelcic N., Heath R.W. "Investigating the IEEE 802.11ad standard for millimeter wave automotive radar," *Proceedings of the 82nd IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Fall 2015*, USA, September 2015.
18. Leonhardt U. "Optical conformal mapping," *American Association for the Advancement of Science. Science*, 2006, vol. 312, no. 5781, pp. 1777–1780.
19. Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R. "Controlling electromagnetic fields," *American Association for the Advancement of Science. Science*, 2006, vol. 312, no. 5781, pp. 1780–1782.
20. Luneberg R.K. "Mathematical theory of optics", Brown University, Providence, RI, USA, 1944.
21. Schrank H., Sanford J. "A Luneberg-lens update," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 1995, vol. 37, no. 1, pp. 76–79.

Submitted 29.10.2020; revised 18.12.2020

Information about the authors

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

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Leading Engineer of JSC "IRKOS" (21, Zvezdnyy avenue, Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

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

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

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ ОТ ИСПОЛЪЗУЕМОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПОДЛОЖКИ

С.М. Фёдоров, А.С. Бадаев, Е.А. Ищенко, Е.В. Папина, К.А. Бердников, С.И. Деревянкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается антенна Вивальди, рабочий диапазон которой соответствует частотам, выделенным Государственной комиссией по радиочастотам для сетей пятого поколения. Применение различных проводниковых материалов при изготовлении излучателя позволяет достичь как экономических преимуществ, так и требуемых характеристик диаграмм направленности. В процессе моделирования были определены обратные потери антенны, а также влияние на них материала изготовления проводящей части антенны, диаграммы направленности, коэффициента полезного действия. Все характеристики определялись путем электродинамического моделирования. Исследование производилось для таких проводящих материалов, как медь, алюминий, золото, серебро, железо, платина, тантал, молибден. По полученным результатам было определено, что наилучшим проводником является серебро, при этом медь и алюминий не сильно уступают ему по характеристикам излучения и эффективности. Наихудшими материалами изготовления проводниковой части антенны являются тантал, железо и платина, так при их применении происходит снижение коэффициента полезного действия антенны, реального коэффициента усиления антенны. В статье представлены графики S_{11} -параметров для исследуемых случаев, произведено их сравнение, а также приведены основные характеристики диаграмм направленности и определено влияние на них проводниковых материалов

Ключевые слова: антенна Вивальди, матрица рассеяния, обратные потери, диаграмма направленности, проводниковые материалы

Введение

Печатные антенны являются одними из самых простых по технологии производства, так как они представляют собой диэлектрическую подложку, на которую напыляется тонкая проводящая пленка. Как правило материалом изготовления данной пленки является медь, но особый интерес с переходом на диапазоны частот свыше 20 ГГц представляет поведение других проводящих материалов [1].

Частоты свыше 20 ГГц относятся к диапазону сетей пятого поколения (5G), так в соответствии с решением ГКРЧ диапазон частот от 24,25 до 24,65 ГГц был выделен ПАО «МТС» для осуществления исследований и работ по обеспечению покрытия сетями 5G. В качестве объекта исследования была выбрана антенна Вивальди [2], предназначенная для работы в диапазоне частот для сетей пятого поколения.

Основные характеристики исследуемой антенны Вивальди

Размеры исследуемой антенны Вивальди приведены в табл. 1, в качестве материала подложки был выбран Rogers RO4003C, который

предназначен для работы в областях СВЧ, превышающих 10 ГГц.

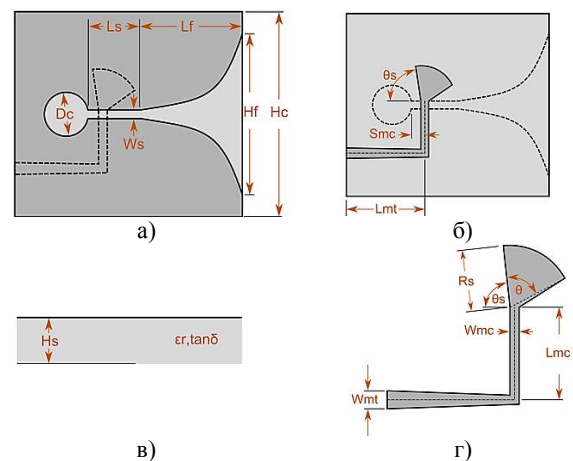


Рис. 1. Модель антенны с указанием параметров:
а) вид сверху; б) вид снизу; в) вид сбоку;
г) вид линии питания

Таблица 1

Размеры исследуемой антенны						
Hf, мм	Lf, мм	Hc, мм	Dc, мкм	Smc, мкм	Lmc, мкм	Wmc, мкм
7,42	14,18	9,45	952,5	84,37	952,5	168,7
Lmt, мм	Wmt, мкм	Ls, мкм	Ws, мкм	Rs, мкм	θ_s , °	Hs, мкм
2,07	470	168,7	69,65	750,3	90	203

Для отслеживания влияния проводниковых материалов на характеристики антенны используются диаграммы направленности, а также главная диагональ матрицы рассеяния. Так как в процессе моделирования используется только одна антенна, тогда обратные потери будут иметь следующее аналитическое определение:

$$S_{11} \text{ (дБ)} = 20 \log \left(\frac{KCBH - 1}{KCBH + 1} \right),$$

где КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению.

В идеальном случае КСВН=1, что соответствует ситуации, когда отсутствуют отражения в СВЧ структуре, а, следовательно, значение S_{11} параметра будет устремлено к минус бесконечности. Однако данное значение недостижимо в реальной жизни, а пороговым значением работы антенны принят уровень $S_{11} = -10$ дБ и меньше.

В процессе исследования особо важными, помимо значений уровня обратных потерь, являются следующие:

- 1) коэффициент направленного действия антенны;
- 2) реальный коэффициент усиления, который учитывает потери на рассогласовании линии питания и антенны;
- 3) КПД антенны;
- 4) ширина главного лепестка по уровню половины мощности (3 дБ).

В качестве рассматриваемых материалов изготовления антенны были выбраны следующие: алюминий, медь, золото, железо, молибден, платина, серебро и тантал.

В процессе выполнения электродинамического моделирования было обнаружено, что форма диаграмм направленности на частотах в диапазоне 24,25-24,65 ГГц практически не изменяется по форме, а изменяются лишь максимальные значения. На рис. 2 приведены диаграммы направленности антенны Вивальди на частоте 24,45 ГГц (середина диапазона), когда в качестве материала изготовления выступала медь.

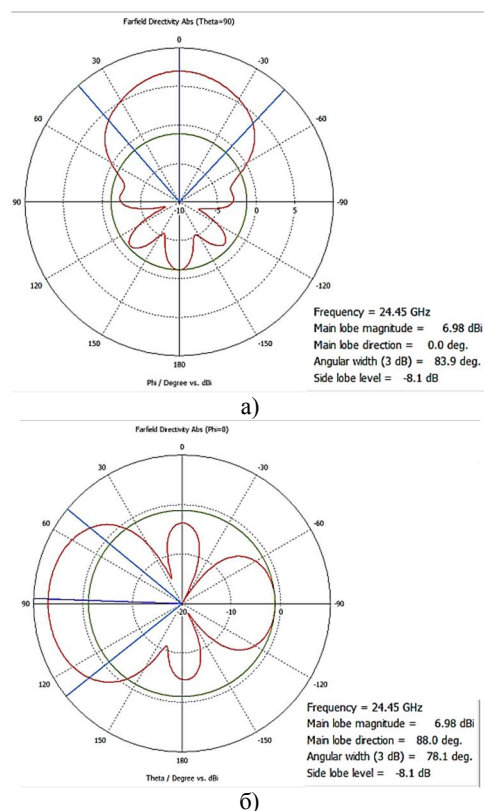


Рис. 2. Диаграммы направленности антенны Вивальди на частот 24,45 ГГц: а) - $\theta = 90^\circ$; б) - $\varphi = 0^\circ$

По полученным диаграммам направленности видно, что направление излучения главного лепестка равно 0° , а КНД антенны без учета потерь на рассогласование составляет 6,98 дБи.

Исследование влияния проводниковых материалов на S-параметры антенны Вивальди

S-параметры являются удобным инструментом для определения характеристик СВЧ-устройств, так как на их основе можно определить уровень потерь на отражение электромагнитной волны. В табл. 2 приведены значения минимумов S_{11} параметров для рассматриваемой антенны, а также частоты наблюдения минимума.

Таблица 2

Анализ характеристик обратных потерь антенны в зависимости от проводника

	Медь	Алюминий	Золото	Серебро	Железо	Платина	Тантал	Молибден
Частота минимума, ГГц	24,225	24,225	24,225	24,225	24,125	24,154	24,154	24,225
S_{11} , дБ	-46,18	-45,39	-45,79	-46,26	-36,31	-36,27	-36,15	-44,15

Как видно по полученным результатам наименьшим значением S_{11} параметров обладает антенна, проводящая часть которой выполнена из серебра, при этом близкими значениями к ней обладает медь, а наихудшие параметры обратных потерь соответствуют танталу, при этом у железа, платины, тантала наблюдается смещение частоты минимума S_{11} парамет-

ров на 0,071 ГГц, а также значение их обратных потерь больше -40 дБ.

На рис. 3 приведены графики S_{11} параметров для исследуемой антенны Вивальди, при этом на графике нанесены минимальные значения, а названия металлов соответствуют кривым, которые были получены при их использо-

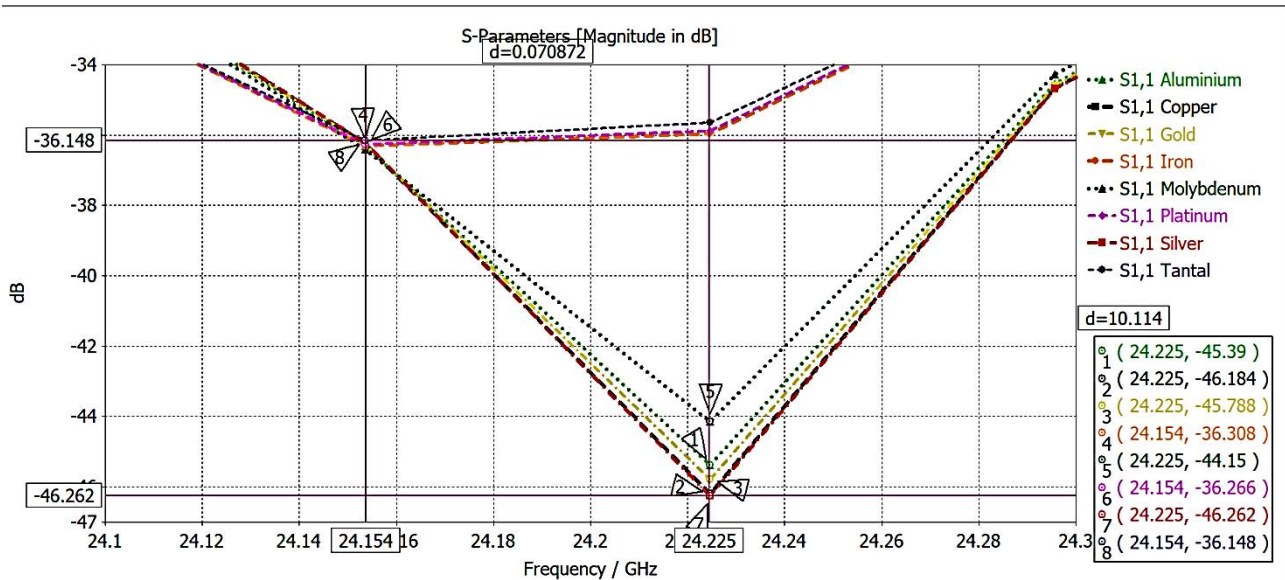


Рис. 3. Графики обратных потерь в зависимости от материала изготовления антенны

На основе полученных графиков видно, что все характеристики практически приближаются друг к другу в точке 24,154 ГГц, при этом у таких материалов, как железо, платина и тантал отсутствует спуск вниз S_{11} -параметров, однако, они придерживаются одного уровня в -36 дБ на широком диапазоне частот.

Исследование влияния проводниковых материалов на диаграммы направленности антенны Вивальди

Диаграммы направленности являются самой важной характеристикой любой антенны. Для их построения в рассматриваемом случае применялось электродинамическое моделирование методом Вейланда. На основе полученных данных была сформирована табл. 3, в которой содержатся все основные результаты диаграмм направленности, которые позволяют определить эффективность антенны.

Так в таблице приводятся КНД антенны, ширина главного лепестка по уровню половины мощности и уровень боковых лепестков, когда угол места = 90° ($\theta = 90^\circ$); КПД антенны, реальный коэффициент усиления антенны.

Все результаты были определены на частоте 24,45 ГГц, так как данная частота является серединой диапазона частот сетей пятого поколения.

По полученным результатам видно, что самым эффективным материалом для изготовления рассматриваемой антенны Вивальди является серебро, что обусловлено его очень хорошими характеристиками проводимости для СВЧ устройств, однако у серебра присутствует негативное свойство – проникновение внутрь диэлектрической подложки, что может вывести из строя антенну. Медь является наиболее оптимальным материалом для напыления на подложку и изготовления излучателя, однако в случае, когда требуется достичь максимальной экономической выгоды, можно применять алюминий, так как характеристики антенны, изготовленной на основе алюминия не сильно отличаются от медного.

Самыми худшими характеристиками обладает тантал, что вызвано наибольшими рас-
согласованиями в линиях питания при его применении.

Таблица 3

Зависимость характеристик диаграмм направленности от материала изготовления излучателя

	Медь	Алюминий	Золото	Серебро	Железо	Платина	Тантал	Молибден
КНД ($\theta = 90^\circ$), дБи	6,98	6,98	6,98	6,97	6,96	6,97	6,97	6,98
Ширина главного лепестка 3 дБ ($\theta = 90^\circ$), °	83,9	83,9	83,9	83,9	83,2	83,2	83,2	83,8
Уровень боковых лепестков ($\theta = 90^\circ$), дБ	-8,1	-8,1	-8,1	-8,1	-8,2	-8,2	-8,2	-8,1
КПД антенны, %	93,42	93,11	93,27	93,45	92,44	92,33	92,03	92,58
Реальный коэффициент усиления, дБи	6,68	6,67	6,67	6,68	6,62	6,62	6,61	6,64

Заключение

В процессе исследования проводниковых материалов для изготовления антенны Вивальди было обнаружено, что наилучшим материалом изготовления проводящей части антенны является серебро, однако ввиду склонности к проникновению в диэлектрические подложки, а также к дороговизне металла рекомендуется использовать медь.

Когда требуется достичь максимальной эффективности с экономической точки зрения медный проводник может быть заменён алю-

миниевым, при этом произойдет незначительное снижение КПД антенны и реального коэффициента усиления.

Литература

1. Чернышов А.В., Бадаев А.С. Радиоматериалы: проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы: учеб. пособие. Воронеж: Из-во ВГТУ, 2008. 202 с.
2. Анализ существующих конструкций антенных элементов пеленгационных решеток / К.О. Волков, Ю.Г. Пастернак, К.А. Разинкин, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 6. С. 66-69.

Поступила 29.10.2020; принята к публикации 21.12.2020

Информация об авторах

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Бадаев Андрей Станиславович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29

Ищенко Евгений Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Папина Елизавета Владимировна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

Бердников Кирилл Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru

Деревянкин Сергей Игоревич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: derevyankin_sergej@bk.ru

DEPENDENCE OF VIVALDI ANTENNA CHARACTERISTICS ON THE SUBSTRATE METALLIZATION

S.M. Fyedorov, A.S. Badaev, E.A. Ishchenko, E.V. Papina, K.A. Berdnikov, S.I. Derevyankin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers a Vivaldi antenna, the operating range of which corresponds to the frequencies allocated by the State Commission on Radio Frequencies for fifth generation networks. The use of various conductive materials in the manufacture of the emitter allows one to achieve both economic advantages and the required characteristics of radiation patterns. In the process of modeling, we determined the return losses of the antenna, as well as the influence on them of the material of the conductive part of the antenna, the radiation pattern, and the efficiency. We determined all characteristics by electrodynamic modeling. The study was carried out for conductive materials such as copper, aluminum, gold, silver, iron, platinum, tantalum, molybdenum. Based on the results obtained, we determined that the best conductor is silver, while copper and aluminum are not much inferior to it in terms of radiation and efficiency. The worst materials for the manufacture of the conductive part of the antenna are tantalum, iron and platinum, so when they are used, the efficiency of the antenna, the real gain of the antenna, decreases. The article presents graphs of S_{11} -parameters for the cases under study, compares them, and also presents the main characteristics of the directional patterns and determines the effect of conductive material on them

Key words: Vivaldi antenna, scattering matrix, return loss, radiation pattern, conductor materials

References

1. Chernyshov A.V., Badaev A.S. "Radio materials: conductor, semiconductor and magnetic materials" ("Radiomaterialy: provodnikovyye, poluprovodnikovyye i magnitnyye materialy"), textbook, VSTU, 2008, 202 p.
2. Volkov K.O., Pasternak Yu. G., Razinkin K.A., Fyedorov S.M. "Analysis of existing structures of antenna element for DF arrays", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 6. pp 66-69.

Submitted 29.10.2020; revised 21.12.2020

Information about the authors

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Andrey S. Badaev, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29

Evgeniy A. Ishchenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Elizaveta V. Papina, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

Kirill A. Berdnikov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru

Sergey I. Derevyankin, student, Voronezh state Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: derevyankin_sergej@bk.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ АВТОМАТОВ С ПАМЯТЬЮ НА ПЛИС

А.А. Пирогов¹, Ю.А. Пирогова¹, С.А. Гвозденко¹, Д.В. Шардаков¹, Э.В. Сёмка²

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) - это настраиваемые интегральные схемы, логика которых определяется программированием. ПЛИС производятся полностью в готовом виде, т.е. относятся к стандартной продукции, что сопровождается известными преимуществами - массовым производством и снижением затрат. Благодаря регулярной структуре ПЛИС реализованы с уровнем интеграции, близким к максимально эффективному. Использование ПЛИС позволяет получить устройства, которые могут менять конфигурацию, подстраиваясь под конкретную задачу, благодаря своей гибко изменяемой, программируемой структуре. При разработке сложных устройств в качестве компонентов для проектирования могут использоваться готовые блоки: IP-ядра или сложно-функциональные блоки (СФ-блоки). Применение программных СФ-блоков позволяет максимально эффективно использовать их в итоговом проекте, таким образом во многом снижаются затраты на проектирование. Цель работы – изучение методики описания триггеров на языке VHDL, применения встроенного схемного редактора Active HDL для формирования структур различных цифровых автоматов и верификации моделей на логическом уровне. В данном исследовании рассмотрены схемы генераторов псевдослучайных последовательностей, которые находят применение в задачах криптографии, где свойства программируемой структуры ПЛИС достаточно актуальны

Ключевые слова: цифровые автоматы с памятью, программируемая логика, временная диаграмма

Введение

Программный комплекс Active HDL позволяет проводить разработку цифровых функциональных узлов на логическом уровне. Результатом моделирования в данном случае является RTL-модель устройства на языках описания оборудования VHDL или Verilog.

Модели возможно формировать при использовании трех разных маршрутов проектирования (рис. 1):

HDE – режим прямого программирования устройства на языках VHDL или Verilog.

FSM – режим функционального моделирования цифровых автоматов.

BDE – режим формирования схем устройств на логических элементах.

Functional simulation – верификация проекта на логическом уровне. Построение временных диаграмм работы сформированных функциональных узлов.

Далее следует отладка и физическая верификация проекта на физическом уровне с использованием отладочных плат на основе программируемых логических интегральных схем [1].

При запуске система Active HDL предлагает создать или выбрать рабочую папку на диске для разрабатываемых моделей проекта. После этого в системе необходимо выбрать допустимый способ формирования нового проекта:

1. Создание пустого проекта и дальнейшее формирование его структуры.
2. Создание пустого проекта с иллюстрацией полного маршрута его проектирования и выбора типа проекта.
3. Добавление элементов к существующему проекту.
4. Импорт проекта из Active-CAD.

После выбора способа формирования проекта в системе указывается язык программирования VHDL или Verilog, на котором будут описаны выходные RTL-модели проекта. Затем необходимо указать имя проекта. По умолчанию он будет привязан к созданной ранее рабочей папке. Интерфейс программы представляет собой набор следующих рабочих элементов:

1. Основное рабочее окно для формирования схем на логических элементах и описания проекта на языках VHDL или Verilog.
2. Дерево проекта, с набором входящих в его состав файлов функциональных узлов.

3. Главное меню и панель инструментов с вынесенными основными функциями.

4. Окно терминала, в котором выводится информация о статусе компиляции, возмож-

ные ошибки и предупреждения, состояния этапов моделирования.

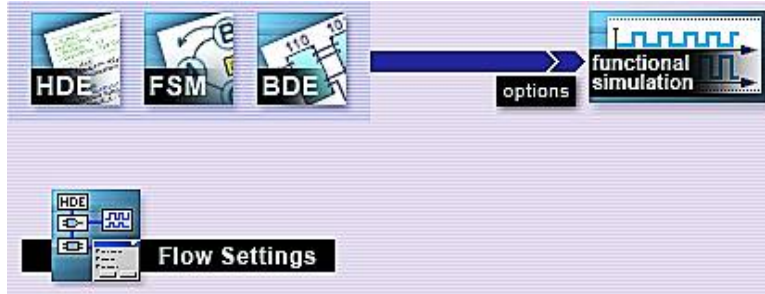


Рис. 1. Маршрут проектирования устройства в Active HDL

В режиме схемного редактора (BDE) схема устройства формируется с использованием следующего набора инструментов:

1. Встроенной библиотеки логических элементов, которая может быть дополнена новыми собственными компонентами. Каждый скомпилированный новый файл проекта может быть добавлен в библиотеку как отдельный ее компонент.

2. Инструмента построения линий межблочных связей и шин данных.

3. Инструмента установки портов ввода и вывода устройства. В процессе моделирования на входные порты подаются формируемые симулятором сигналы, а по состоянию выходных портов отслеживается поведение модели в целом.

При использовании шин данных в проекте необходимо после выбора соответствующего инструмента задать шине ряд параметров, основными являются имя и разрядность. При выборе портов ввода и вывода также в системе предусмотрен соответствующий интерфейс. После выбора порта при необходимости ему назначается имя, а если это порт шины, то и требуемая разрядность. При компиляции файлов проекта в библиотеку компонентов добавляются новые сформированные элементы. Благодаря этому есть возможность формировать новые проекты с использованием этих иерархических блоков.

После проведения компиляции проекта проводится его верификация на логическом уровне. Для этого в режиме Waveform необходимо добавить порты ввода и вывода устройства в меню Add Signals. Каждому входному порту назначается доступный режим симуляции. Для задания входных воздействий могут быть использованы следующие режимы:

1. Clock – задание прямоугольного импульса с установкой требуемой частоты или длительности.

2. Formula – задание сложного аperiodического воздействия.

3. Value – задание фиксированных состояний на вход (логический ноль или логическая единица).

4. Hotkey – задание входного воздействия с возможностью переключения входных состояний с использованием зарезервированных «горячих» клавиш клавиатуры.

На основе выполненных установок симулятор обрабатывает заданный промежуток времени и формирует на экране временную диаграмму работы устройства [2].

Проектирование базовых компонентов цифровых автоматов с памятью

В основе проектируемых автоматов с памятью были использованы универсальные JK-триггеры. Модель триггера и временная диаграмма работы модели представлены на рис. 2 и рис. 3. Триггер имеет входы синхронного сброса (K) и установки (J), вход синхроимпульса (Clk), вход сброса синхронного (Clr). Выходы у триггера взаимно инверсные (Q) и (notQ).

Исходное кодовое описание триггера на языке описания аппаратуры VHDL в данной работе было дополнено и сформирована модель JK-триггера с дополнительными асинхронными входами сброса (R) и установки (S). Данная модель понадобится в дальнейшем для нашей работы (рис. 3).

На рис. 4 представлена модель последовательно-параллельного регистра. Регистры представляют простые автоматы с памятью на

основе триггеров. Представленная модель регистра позволяет записать код числа в последовательном коде и одновременно считать

состояния всех триггеров, получив при этом его параллельный код.

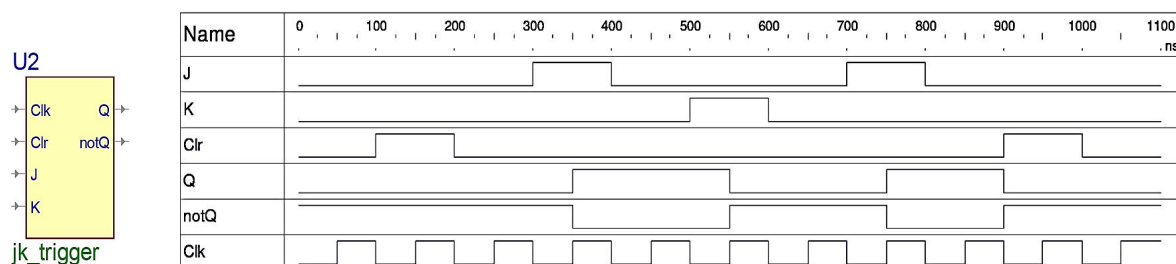


Рис. 2. Модель JK-триггера

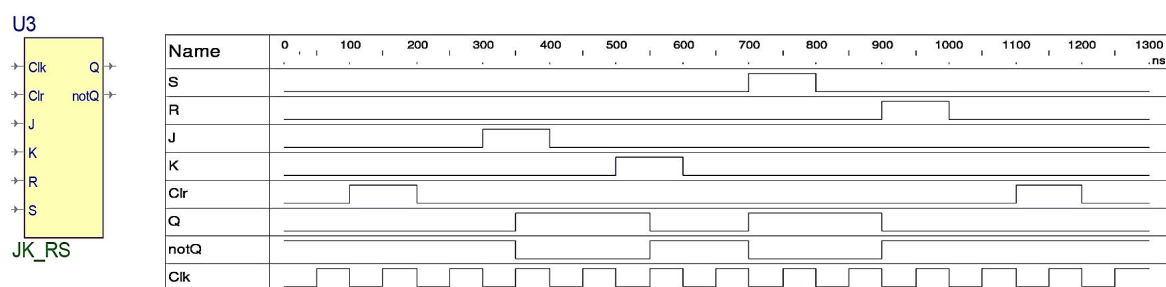


Рис. 3. Модель JK-триггера с асинхронными входами сброса и установки

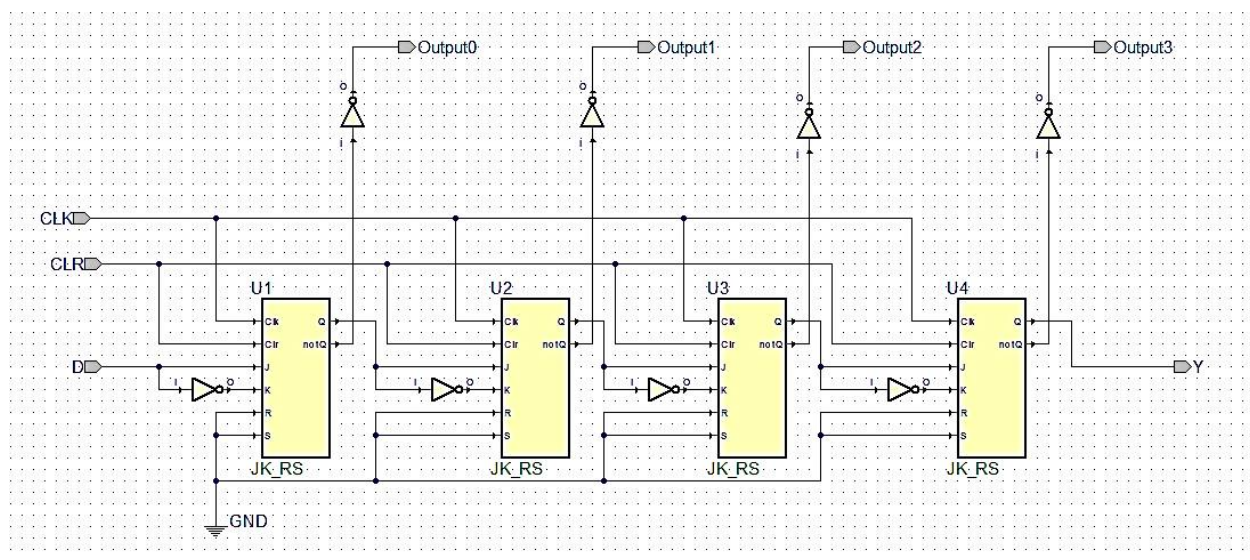


Рис. 4. Последовательно-параллельный регистр на JK-триггерах

Временная диаграмма работы (рис. 5.) последовательно-параллельного регистра представлена на рисунке ниже. В регистр вводится один бит, который последовательно смещается по каждому такту синхриимпульса. На выходе

регистра (Y) снимается последовательно полученный входной двоичный код. Параллельное чтение кодовой комбинации идет с выходов (Output0 - Output3).

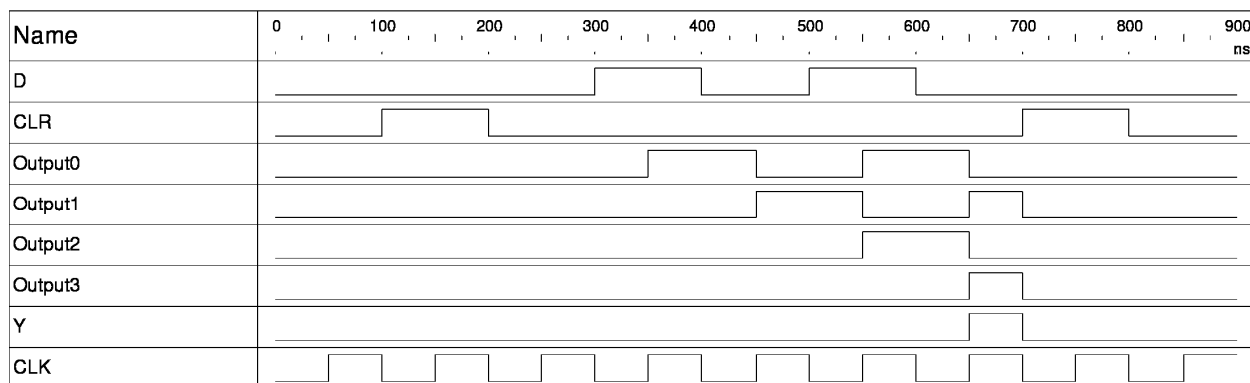


Рис. 5. Временная диаграмма работы четырехразрядного последовательно-параллельного регистра

Далее представлена модель четырехразрядного двоичного счетчика прямого счета (рис. 6). Счетчик представляет собой устройство генерирования заданной последовательности кодов, обеспечивает подсчет импульсов.

В данном случае счетчиком происходит генерирование кодовых комбинаций от 0000_2 (0_{10}) до 1111_2 (15_{10}). Переключение счетчика наступает при поступлении фронта сигнала синхронимпульса (Clk).

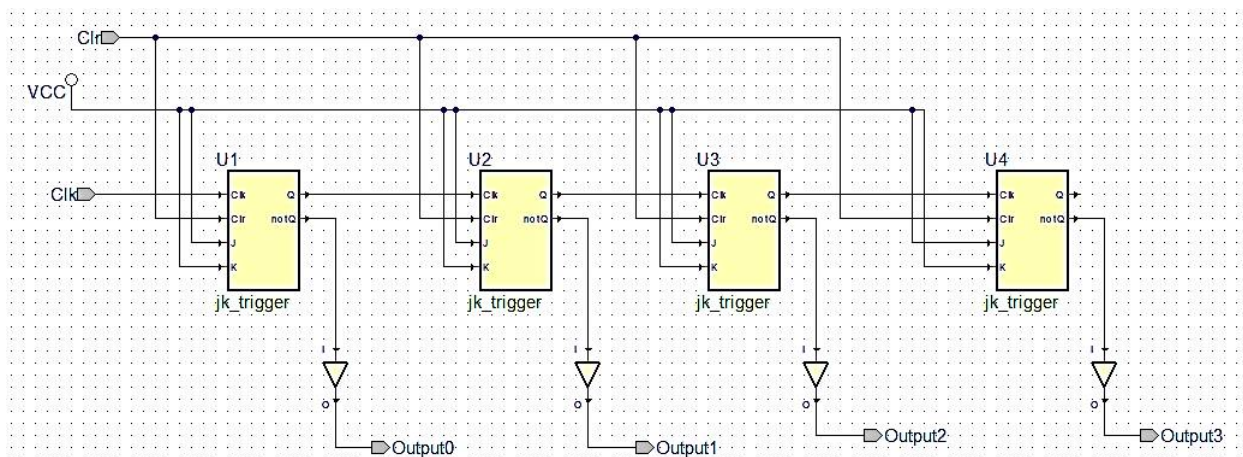


Рис. 6. Модель четырехразрядного двоичного счетчика

Временная диаграмма работы четырехразрядного двоичного счетчика представлена на рис. 7. Из диаграммы видно, что после об-

щего сброса устройства (Clr) счетчик формирует максимальное значение кода на 16 с момента сброса импульс.

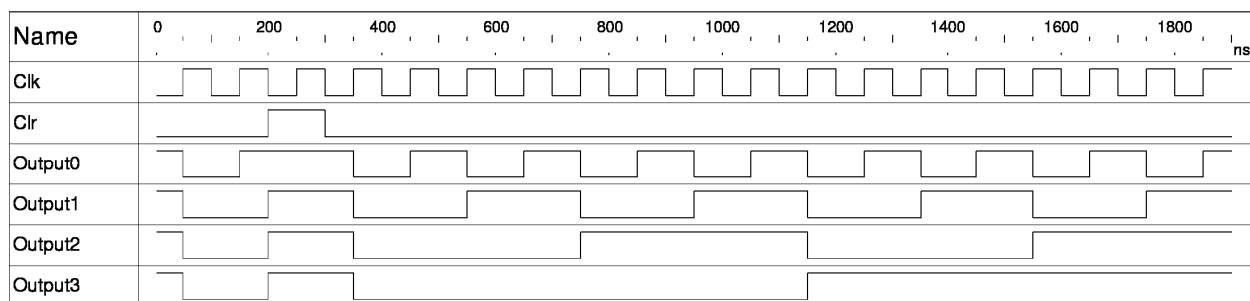


Рис. 7. Временная диаграмма работы четырехразрядного двоичного счетчика

Проектирование генератора псевдослучайной последовательности Фибоначчи

Регистры сдвига, отличительной особенностью которых является наличие обратной связи, т.е. когда начальное состояние младшего бита регистра зависит как от исходной установки, так и от состояний старших его бит, называют регистрами сдвига с линейной обратной связью. В данной работе рассмотрим методику организации устройств с применением такого типа регистров.

Рассмотрим модель генератора псевдослучайной последовательности Фибоначчи трехразрядного двоичного кода, выполненного на основе регистра сдвига, с использованием JK-триггеров с асинхронными входами сброса и установки (рис. 8). Для конфигурации Фибоначчи функция обратной связи имеет следующий вид:

$$S_j = S_{j-1} \oplus S_{j-3}, \quad (1)$$

где S_j – состояние j -й ячейки регистра сдвига генератора последовательности Фибоначчи.

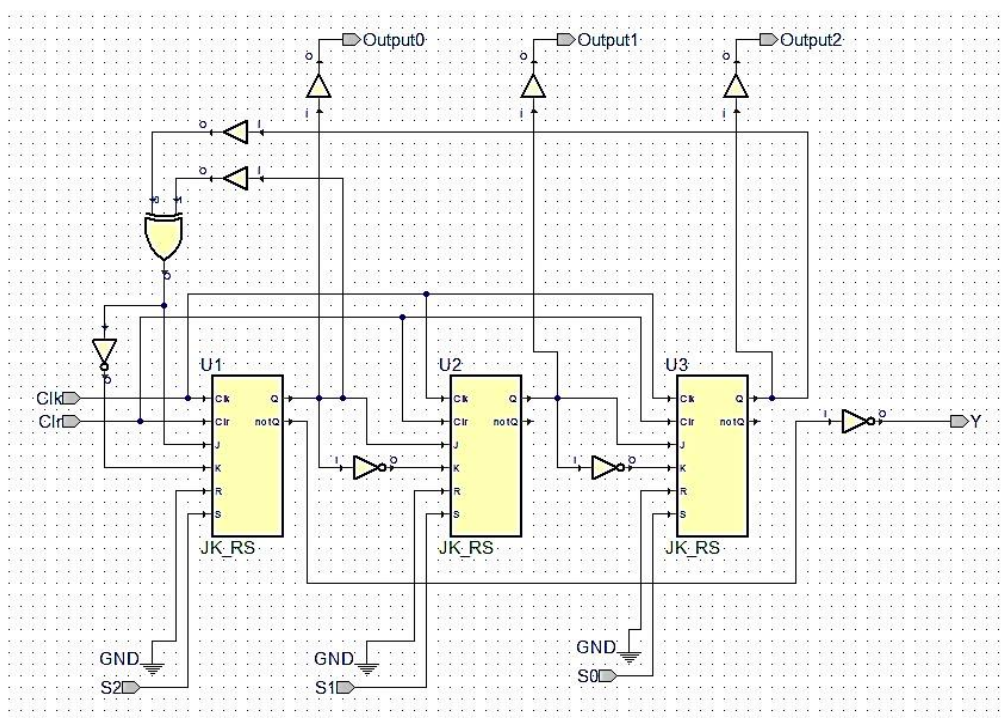


Рис. 8. Генератор псевдослучайной последовательности Фибоначчи

Пусть начальное состояние регистра сдвига равно единице (001_2), основываясь на выражении обратной связи, можем построить таблицу кодовых комбинаций последовательности Фибоначчи.

На седьмом такте работы модели состояние выходного параметра вернулось к начальному и начиная со следующего будет идти повторение генерируемой кодовой комбинации [3].

Ниже представлена временная диаграмма генератора последовательности Фибоначчи (рис. 9).

Таблица 1
Таблица кодовых комбинаций последовательности Фибоначчи

Номер шага	Состояние	Генерируемый бит
0	001	1
1	100	0
2	110	0
3	111	1
4	011	1
5	101	1
6	010	0
7	001	1

Из диаграммы видно, что переключение генератора происходит по фронту синхроим-

пульса (Clk), а полученный код на выходе (Y) модели соответствует исходной таблицы кодо-

вых комбинаций последовательности Фибоначчи.

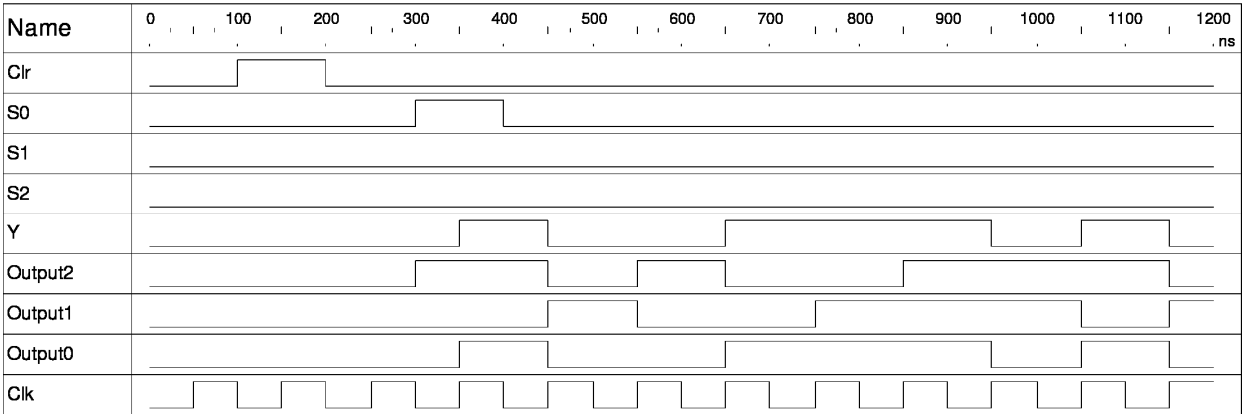


Рис. 9. Временная диаграмма генератора псевдослучайной последовательности Фибоначчи

Проектирование генератора псевдослучайной последовательности Галуа

На рис. 10 представлен генератор псевдослучайной последовательности Галуа трехразрядного двоичного кода. Таблица кодовых комбинаций последовательности Галуа представлена ниже.

Таблица 2

Таблица кодовых комбинаций последовательности Галуа

Номер шага	Состояние	Генерируемый бит
0	001	1
1	101	1
2	111	1
3	110	0
4	011	1
5	100	0
6	010	0
7	001	1

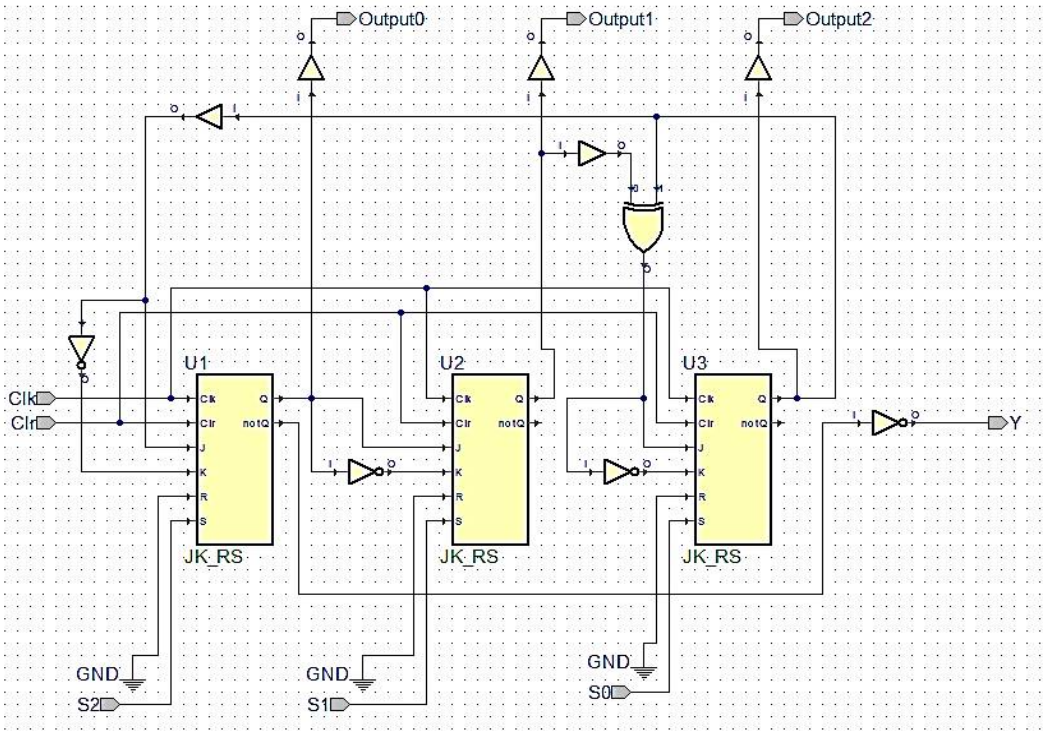


Рис. 10. Генератор псевдослучайной последовательности Галуа

Внутреннее состояние регистра на седьмом шаге вернулось к исходному (рис. 11), следовательно, его период, так же как и в прошлом случае, равен 7. В отличие от конфигу-

рации Фибоначчи внутренние состояния регистра получились другие, но генерируемая последовательность совпадает с кодом Фибоначчи, только сдвинута на 4 такта.

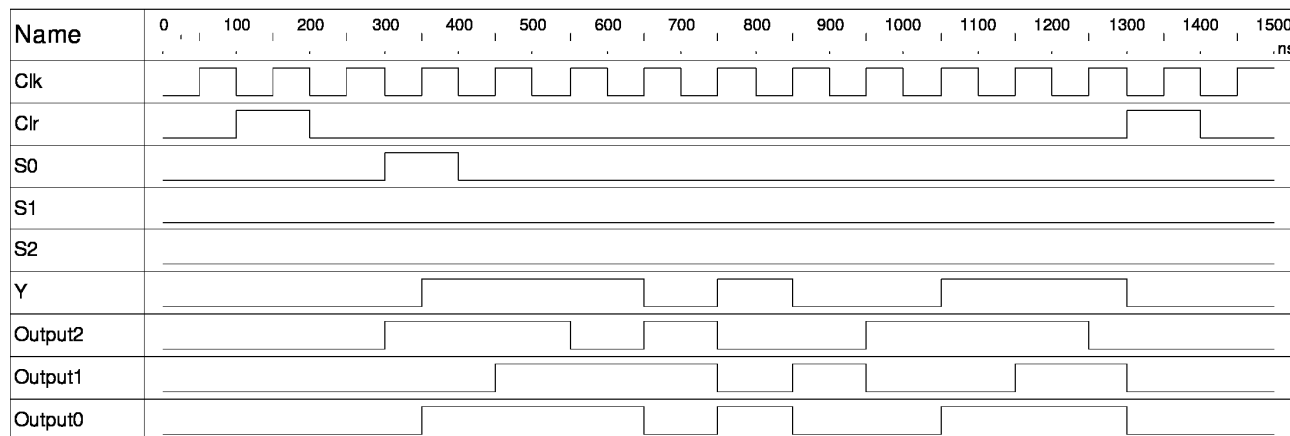


Рис. 11. Генератор псевдослучайной последовательности Галуа

Анализируя временную диаграмму можно провести функциональную верификацию и сопоставить полученные результаты с заданной математической моделью или таблицей истинности [4].

Полученные модели генераторов на логическом уровне являются идеализированными, отражают только изменение выходных параметров относительно входных воздействий. Данные модели не учитывают электрические и временные параметры задержки системы. Но моделей такого уровня достаточно для дальнейшей реализации устройства на базе ПЛИС.

Заключение

В результате проведенного исследования были получены модели различных цифровых автоматов – генераторов псевдослучайных последовательностей Фибоначчи и Галуа. Модели были построены с использованием специализированного программного обеспечения Active HDL с использованием встроенного редактора схем. Полученные результаты можно использовать в системах, которые могут быть сконфигурированы на базе ПЛИС, и в структурах сложно-функциональных (СФ – блоков).

Модели имеют открытую архитектуру, что позволяет адаптировать их и использовать для разных задач. Это актуально для генераторов псевдослучайных последовательностей, которые на основе данных моделей возможно программно конфигурировать в рамках задач криптографии.

Литература

1. Экспериментальное исследование сверхширокополосной антенны, построенной на основе модификации плоской линзы Люнеберга / С.А. Антипов, А.В. Ашихмин, В.В. Негроров, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 3. С. 113-118.
2. Башкиров А.В., Свиридова И.В., Муратов А.В. Эффективное многопороговое декодирование недвоичных кодов с предварительной оценкой ошибочности проверок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 3. С. 99-101.
3. Пирогов А.А. Методы повышения помехозащищенности и эффективности кодирования сетей связи абонентского доступа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 162-163.
4. Методика проектирования синтезатора частот прямого цифрового синтеза на базе ПЛИС / А.А. Пирогов, Е.А. Бочаров, Э.В. Сёмка, О.Ю. Макаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 108-116.

Поступила 26.10.2020; принята к публикации 21.12.2020

Информация об авторах

Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Пирогова Юлия Александровна – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: gvendilon@mail.ru
Гвозденко Сергей Анатольевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: jgsar@mail.ru
Шардаков Дмитрий Вячеславович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: demon.shar@yandex.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

DEVELOPMENT OF A PROCEDURE FOR DESIGNING DIGITAL AUTOMATES WITH MEMORY ON FPGA

A.A. Pirogov¹, Yu.A. Pirogova¹, S.A. Gvozdenko¹, D.V. Shardakov¹, 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: programmable logic integrated circuits (FPGAs) are custom integrated circuits whose logic is defined by programming. FPGAs are manufactured completely off-the-shelf, i.e. belong to standard products, which is accompanied by well-known advantages - mass production and cost reduction. Due to the regular structure, FPGAs are implemented with a level of integration close to the most efficient one. The use of FPGAs makes it possible to obtain devices that can change configuration, adjusting to a specific task, thanks to their flexible, programmable structure. When developing complex devices, ready-made blocks - IP-cores or complex-functional blocks (SF blocks) - can be used as components for design. The use of software SF blocks allows you to use them as efficiently as possible in the final project, largely reducing design costs. The purpose of the work is to study the technique of describing triggers in the VHDL language, using the built-in Active HDL schematic editor to form the structures of various digital automata and verifying models at the logical level. In this study, we considered schemes of pseudo-random sequence generators, which are used in cryptography problems, where the properties of the programmable FPGA structure are quite relevant

Key words: digital automata with memory, programmable logic, timing diagram

References

1. Antipov S.A., Ashikhmin A.V., Negrobov V.V., Fyedorov S.M. “Experimental study of an ultra-wideband antenna based on a modification of a flat Luneberg lens”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol.8, no. 3, pp. 113-118.
2. Bashkurov A.V., Sviridova I.V., Muratov A.V. “Efficient multi-threshold decoding of non-binary codes with preliminary error estimation of checks”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol.11, no. 3, pp. 99-101
3. Pirogov A.A. “Methods for increasing noise immunity and coding efficiency of communication networks of subscriber access”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol.7, no. 1, pp. 162-163.
4. Pirogov A.A., Bocharov E.A., Syemka E.V., Makarov O.Yu. “Methodology for designing a direct digital synthesis frequency synthesizer based on FPGAs”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol.14, no. 6, pp. 108-116.

Submitted 26.10.2020; revised 21.12.2020

Information about the authors

Aleksandr A. Pirogov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com
Yuliya A. Pirogova, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: gvendilon@mail.ru
Sergey A. Gvozdenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: jgsar@mail.ru
Dmitriy V. Shardakov, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: demon.shar@yandex.ru
Eleonora V. Syemka, Assistant Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 "A" Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: semka_elya@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ ФАР, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ СЕГМЕНТО-ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕНН

Ю.Г. Пастернак^{1,2}, В.А. Пендюрин³, К.С. Сафонов²

¹ЗАО «ИРКОС», г. Москва, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

³АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи»,
г. Воронеж, Россия

Аннотация: решение задачи связи в Арктике, а также в тундре, в тайге, в лесу, в море, на полях возможно только с использованием мобильных систем спутниковой связи. ФГУП «Космическая связь» (г. Москва) располагает группировкой спутников, которая постоянно расширяется. Для надежной связи в Арктике и в северных широтах, помимо геостационарных спутников, запущены спутники, движущиеся по высокоорбитальным траекториям. Для переключения со спутника на спутник, входящий в зону видимости абонента, необходимо использовать антенные решетки. Проблема заключается в том, что в настоящее время отсутствуют мобильные терминалы высокоскоростной спутниковой связи, а стоимость зарубежных аналогов препятствует широкому их использованию (достигает 50 тысяч долларов). Обычно радиолокационная связь (РЛС) с фазированной антенной решеткой используется для наблюдения за тысячами угловых точек, для отслеживания сотни целей. Такие требования могут быть выполнены только путем сканирования луча в пространстве в течение микросекунды. Ясно, что необходимо электронное управление лучом, поскольку механически вращать антенну не представляется возможным. Лишь некоторая часть вышеуказанных проблем будет затрагиваться в этой статье, ниже будут представлены электронная модель антенной решетки и её математическая модель

Ключевые слова: математическая модель антенной решетки, сегменто-параболическая антенна

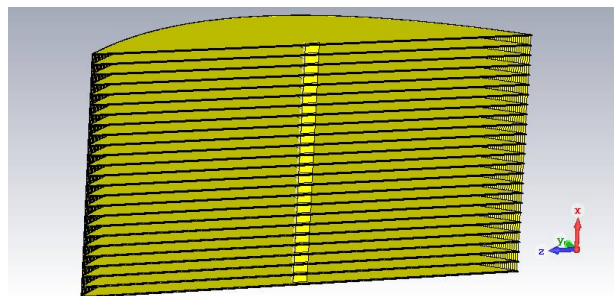
Введение

Перед тем, как создать опытную модель или макет антенной решетки необходимо провести ряд экспериментов, расчетов и подтвердить заданные технические характеристики ФАР. Основная мотивация для разработки фазированных антенных решеток - это необходимость быстро направлять антенные лучи под самые разные углы. Обычно РЛС с фазированной антенной решеткой используется для наблюдения за тысячами угловых точек, для отслеживания сотни целей. Такие требования могут быть выполнены только путем сканирования луча в пространстве в течение микросекунды. Ясно, что необходимо электронное управление лучом, поскольку механически вращать антенну не представляется возможным.

В данной работе была создана и посчитана математическая модель излучающей апертуры ФАР, основанная на использовании полубесконечных плоских волноводов, разделенных между собой короткозамкнутыми пазами, а также была решена задача возбуждения, для оптимального выбора размеров, геометрии решетки, оптимального шага и оптимального размера четвертьволнового кармана.

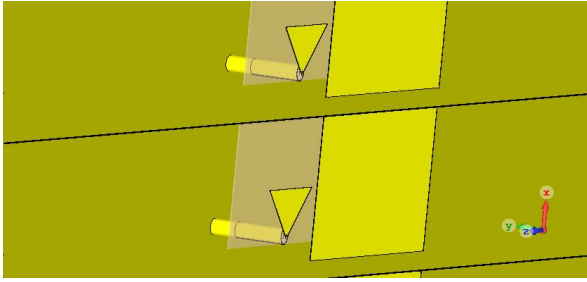
Модель антенной решетки

Антенная решетка состоит из 24 параболических секторных антенн с емкостными короткозамкнутыми карманами, рис. 1. Емкостные короткозамкнутые карманы используются для уменьшения интенсивности поверхностных волн, бегущих вдоль решетки, интерферирующих с объемными волнами и ухудшающими согласование элементов с фидерным трактом и диаграмму направленности ФАР, особенно – при максимальном отклонении луча от нормали.

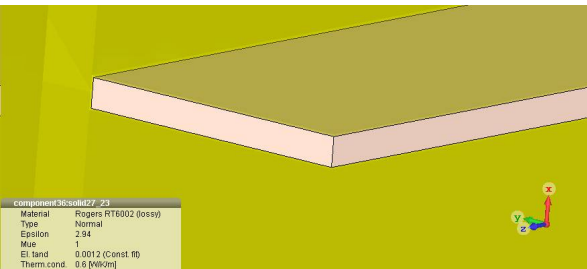
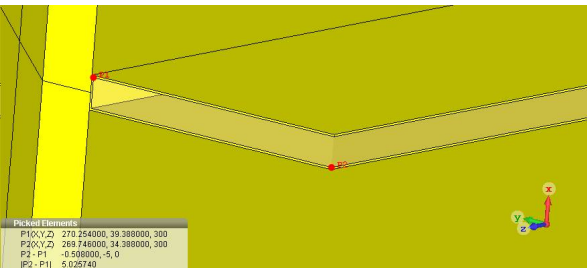
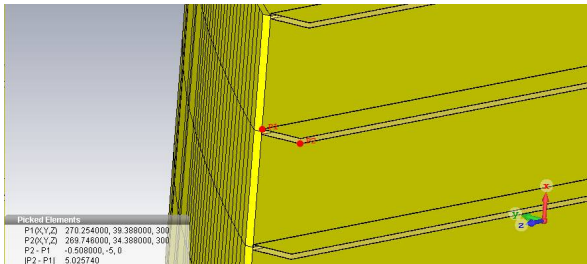


а) общий вид антенной решетки
из 24 сегменто-параболических антенн

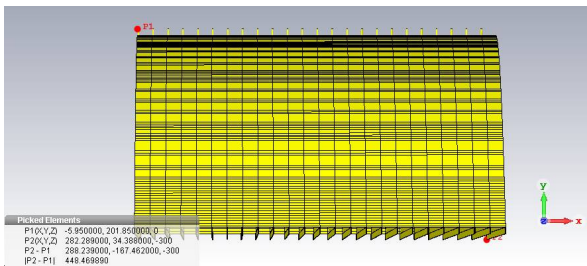
Рис. 1. Конструкция ФАР из 24 сегменто-параболических антенн



б) запитка элементов осуществляется с помощью коаксиальных кабелей марки EZ_47_Al_TP_M17 с внешним диаметром 1.2 мм, питающих печатные монополи с рефлексорами



в) конструкция и материал короткозамкнутых карманов с емкостным характером входного сопротивления



г) вид ФАР сбоку. Глубина – 167.5 мм, высота – 288.2 мм, ширина – 600 мм

Рис. 1. Конструкция ФАР из 24 сегменто-параболических антенн (продолжение)

Математическая модель излучающей апертуры ФАР, основанная на использовании полубесконечных плоских волноводов, разделенных между собой короткозамкнутыми пазами

Рассмотрим модель излучающей апертуры ФАР, основанную на использовании полубесконечных плоских волноводов (область 3 на рис. 2), разделенных между собой короткозамкнутыми пазами (область 2 на рис. 2), рис. 2.

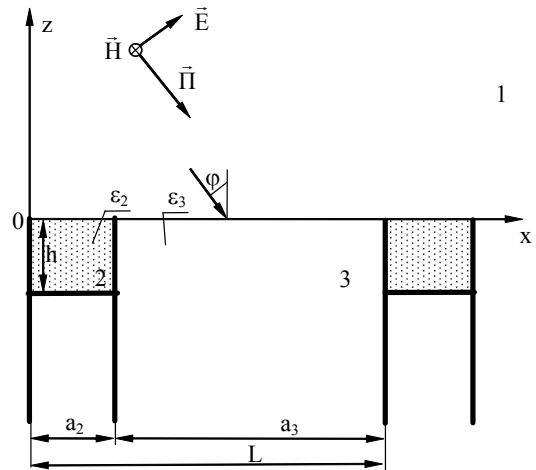


Рис. 2. Модель излучающей апертуры ФАР

Пусть из верхнего полупространства ($z > 0$) на одномерно-периодичную дифракционную решетку ножевого типа, имеющую два смежных паза на периоде (рис. 2), разделенных между собой бесконечно тонкими металлическими ребрами, падает под углом φ плоская Н-поляризованная электромагнитная волна единичной амплитуды, продольная (относительно ребер) составляющая магнитного поля которой определяется как [1]

$$H_y^{nad} = \exp[j\gamma_0 z] \exp[-j\beta_0 x], \quad (1)$$

где $\beta_0 = k_0 \sin \varphi$;

$$\gamma_0 = k_0 \cos \varphi;$$

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0;$$

λ_0 – длина волны в вакууме.

Зависимость от времени подразумевается в виде $\exp[-j\omega t]$.

Определим комплексные амплитуды пространственных гармоник (ПГ) области 1.

Магнитную составляющую рассеянного поля в области 1 представим в виде бесконеч-

ных дискретных наборов пространственных гармоник [2, 3]:

$$H_y^{1\text{ pass}} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[-j\gamma_n z] \exp[j\beta_n x], \quad (2)$$

где $\beta_n = -\beta_0 + 2\pi n/L$;

$$\gamma_n = \sqrt{k_0^2 - \beta_n^2};$$

L – период решетки;

n – номер (порядок) ПГ поля собственной волны;

A_n – неизвестные комплексные амплитуды ПГ области 1.

В прямоугольном пазе 2 поле дифракции представим совокупностью пазовых волноводных мод, учитывая граничное условие для касательной компоненты магнитного поля на идеально проводящем металле $\partial H_y / \partial n \rightarrow 0$, где n – вектор нормали к поверхности металла:

$$H_y^{(2)} = \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(2)} \cos[d_m^{(2)}(z+h)] \cos\left[\frac{m\pi}{a_2} x\right], \quad x \in [0, a_2], \quad (3)$$

$$0, x \notin [0, a_2]$$

$$\text{где } d_m^{(2)} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_2 - (m\pi/a_2)^2};$$

m – номер (порядок) волноводной моды;

$D_m^{(2)}$ – неизвестная комплексная амплитуда

m -й волноводной моды в области 2;

a_2, h – ширина и глубина паза;

ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость материала, которым заполнен паз.

В полубесконечных плоскопараллельных волноводах 3 поле дифракции представим совокупностью пазовых волноводных мод [1]:

$$H_y^{(3)} = \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(3)} \exp[jd_m^{(3)} z] \cos\left[\frac{m\pi}{L-a_2} (x-a_2)\right], \quad x \in [a_2, L], \quad (4)$$

$$0, x \notin [a_2, L];$$

$$\text{где } d_m^{(3)} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_3 - \left(\frac{m\pi}{L-a_2}\right)^2};$$

m – номер (порядок) волноводной моды;

$D_m^{(3)}$ – неизвестная комплексная амплитуда

m -й волноводной моды в области 3;

ε_3 – относительная диэлектрическая проницаемость материала, которым заполнена область 3.

После чего необходимо сшить H_y – компоненту поля на границах областей (1 и 2), а также – областей (1 и 3), являющуюся касательной компонентой магнитного поля для вышеуказанных границ частичных областей.

Для этого разложим функции, описывающие зависимость волноводных мод в областях 2 и 3 от координаты x , по базису функций $\exp[j\beta_n x]$, где индекс $n \in [-\infty; \infty]$.

Далее мы должны сшить также касательные компоненты электрической составляющей поля E_x в областях (1 и 2), а также (1 и 3).

Применим распространенное свойство рядов Фурье [4], в котором говорится о тождественном равенстве двух периодических функций, если тождественно равны соответствующие их коэффициенты Фурье.

Запишем коэффициенты Фурье функций, описывающих зависимость волноводных мод в областях 2 и 3 от координаты x :

$$b_{nm} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{a_2} \cos\left[\frac{m\pi}{a_2} x\right] \cdot \exp(-j\beta_n x) dx = \frac{\exp\left[j\left(\frac{m\pi}{a_2} - \beta_n\right)a_2\right] - 1}{4j\pi\left(\frac{m\pi}{a_2} - \beta_n\right)} + \frac{\exp\left[j\left(-\beta_n - \frac{m\pi}{a_2}\right)a_2\right] - 1}{4j\pi\left(-\beta_n - \frac{m\pi}{a_2}\right)},$$

$$\begin{aligned} c_{nm} &= \frac{1}{2\pi} \int_{a_2}^L \cos\left[\frac{m\pi}{L-a_2} (x-a_2)\right] \cdot \exp(-j\beta_n x) dx = \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{\exp\left[-j\beta_n L\right]}{\left(\frac{m\pi}{L-a_2}\right)^2 - \beta_n^2} \left(-\frac{m\pi}{L-a_2} \sin\left(\frac{m\pi a_2}{L-a_2} - \frac{m\pi L}{L-a_2}\right) - j\beta_n \cos\left(\frac{m\pi a_2}{L-a_2} - \frac{m\pi L}{L-a_2}\right)\right) + \\ &+ \frac{1}{2\pi} \frac{j\beta_n \exp\left[-j\beta_n a_2\right]}{\left(\frac{m\pi}{L-a_2}\right)^2 - \beta_n^2} \end{aligned}$$

Сшивая касательную компоненту магнитного поля на границе 1 и 2 областей, получаем:

$$\begin{aligned} \exp[j\gamma_0 z] \exp[-j\beta_0 x] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[-j\gamma_n z] \exp[j\beta_n x] &= \\ = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(2)} b_{nm} \cos[d_m^{(2)}(z+h)] \exp[j\beta_n x], \quad \text{при } z=0, \\ \exp[-j\beta_0 x] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[j\beta_n x] &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(2)} b_{nm} \cos[d_m^{(2)}h] \exp[j\beta_n x], \end{aligned}$$

$$A_n - \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(2)} b_{nm} \cos[d_m^{(2)}h] = -\delta_{n,0}, \quad n \in [-\infty; \infty].$$

Сшивая касательную компоненту магнитного поля на границе 1 и 3 областей, получаем:

$$\begin{aligned} & \exp[j\gamma_0 z] \exp[-j\beta_0 x] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[-j\gamma_n z] \exp[j\beta_n x] = \\ & = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(3)} c_{nm} \exp[jd_m^{(3)} z] \exp[j\beta_n x], \text{ при } z=0, \\ & \exp[-j\beta_0 x] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[j\beta_n x] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(3)} c_{nm} \exp[j\beta_n x], \\ & A_n - \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(3)} c_{nm} = -\delta_{n,0}, \quad n \in [-\infty; \infty]. \end{aligned}$$

В результате получаем следующую парную систему линейных алгебраических уравнений бесконечного порядка относительно неизвестных величин комплексных амплитуд пространственных гармоник Флоке A_n в области 1, комплексных амплитуд волноводных мод [1] D_m^2 в области 2 и комплексных амплитуд волноводных мод D_m^3 в области 3 [5]:

$$\begin{aligned} A_n - \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(2)} b_{nm} \cos[d_m^{(2)} h] &= -\delta_{n,0}, \quad n \in [-\infty; \infty], \\ A_n - \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(3)} c_{nm} &= -\delta_{n,0}, \quad n \in [-\infty; \infty]. \end{aligned}$$

Далее мы должны редуцировать вышеприведенную парную СЛАУ, оставив в ней конечное число уравнений и неизвестных. Задача состоит в выборе соотношения количества учитываемых волноводных мод в областях 2 и 3, которые мы обозначим, как M_2 и M_3 , соответственно.

На границе областей $z=0$ для конечных значений M_k , $k=2,3$ поля областей 2 и 3 характеризуются конечным спектром Фурье, что позволяет рассматривать их в базисе Котельникова [6] с интервалом дискретизации поля в области k -го паза $\Delta x_k = \frac{a_k}{M_k}$. Область, включающая в себя период структуры, объединяет несколько (K) смежных пазов, в данном случае – 2 паза (области 2 и 3).

Поэтому для разложения в ряд Котельникова поля при $x \in [0, L]$ интервалы дискретизации на периоде ДР (Δx_{Σ}) и в частичных областях приняты равными ($\Delta x_{\Sigma} = \Delta x_k$, где $k=2,3$). При этом функции, описывающие

поля в соседних пазах, имеют одинаковую ширину спектра, а высшие гармоники полей – одинаковый период.

С учетом общего количества мод на периоде $M = M_2 + M_3$ получаем обобщенное правило Миттты редуцирования парной СЛАУ:

$$M_k = \text{entier} \left[M \cdot \frac{a_k}{L} \right], \quad (7)$$

причем в поле области 1 удерживаются ПГ с номерами [1] $n = -N_1 \div N_2$, где $N_{1,2} = (M-1)/2 \pm \text{entier}[\Lambda \sin \varphi]$, где $\Lambda = L/\lambda_0$ [7].

Редуцированная система уравнений, полученная при сшивании касательной компоненты магнитного поля, приведена ниже:

$$A_n - \sum_{m=0}^{M_2-1} D_m^{(2)} b_{nm} \cos[d_m^{(2)} h] = -\delta_{n,0}, \quad n = -N_1 \div N_2,$$

$$A_n - \sum_{m=0}^{M_3-1} D_m^{(3)} c_{nm} = -\delta_{n,0}, \quad n = -N_1 \div N_2,$$

$$M = M_2 + M_3 = N_1 + N_2 + 1.$$

Последнее выражение требует равенства числа неизвестных и уравнений.

Далее мы должны сшить касательные компоненты электрического поля E_x на границах областей (1 и 2) и (1 и 3).

Воспользуемся 1-м уравнением Максвелла для нахождения электрической составляющей электромагнитного поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{rot}(\vec{H})}{j\omega_0 \epsilon_a}.$$

В нашем случае $\vec{H} = y_0 \cdot H_y$. Тогда касательная компонента электрического поля E_x равна

$$E_x = \frac{1}{j\omega_0 \epsilon_a} \frac{\partial H_y}{\partial z}.$$

E_x -компонента поля в области 1 описывается следующими уравнениями:

$$E_x^{nad} = \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0} j\gamma_0 \exp[j\gamma_0 z] \exp[-j\beta_0 x],$$

$$E_x^{1\text{ пacc}} = \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} -j\gamma_n A_n \exp[-j\gamma_n z] \exp[j\beta_n x].$$

В области 2 для E_x - компоненты поля справедливо следующее соотношение:

$$E_x^{(2)} = \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0\epsilon_2} \sum_{m=0}^{\infty} -d_m^{(2)} D_m^{(2)} \sin[d_m^{(2)}(z+h)] \cos\left[\frac{m\pi}{a_2} x\right].$$

Аналогичным образом, в области 3 для E_x - компоненты поля запишем:

$$E_x^{(3)} = \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0\epsilon_3} \sum_{m=0}^{\infty} j d_m^{(3)} D_m^{(3)} \exp[j d_m^{(3)} z] \cos\left[\frac{m\pi}{L-a_2} (x-a_2)\right].$$

Сшивая касательную компоненту электрического поля на границе 1 и 2 областей, получаем:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0} j\gamma_0 \exp[j\gamma_0 z] \exp[-j\beta_0 x] + \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} -j\gamma_n A_n \exp[-j\gamma_n z] \exp[j\beta_n x] = \\ & = \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0\epsilon_2} \sum_{m=0}^{\infty} -d_m^{(2)} D_m^{(2)} \sin[d_m^{(2)}(z+h)] \cos\left[\frac{m\pi}{a_2} x\right] = \\ & = \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0\epsilon_2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} -d_m^{(2)} D_m^{(2)} b_{nm} \sin[d_m^{(2)}(z+h)] \exp[j\beta_n x], \text{ при } z=0, \end{aligned}$$

$$j\gamma_0 \exp[-j\beta_0 x] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} -j\gamma_n A_n \exp[j\beta_n x] = \frac{1}{\epsilon_2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} -d_m^{(2)} D_m^{(2)} b_{nm} \sin[d_m^{(2)} h] \exp[j\beta_n x],$$

$$j\gamma_n A_n - \frac{1}{\epsilon_2} \sum_{m=0}^{\infty} d_m^{(2)} D_m^{(2)} b_{nm} \sin[d_m^{(2)} h] = \delta_{n,0} j\gamma_0.$$

Аналогично, сшивая касательную компоненту электрического поля на границе 1 и 3 областей:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0} j\gamma_0 \exp[j\gamma_0 z] \exp[-j\beta_0 x] + \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} -j\gamma_n A_n \exp[-j\gamma_n z] \exp[j\beta_n x] = \\ & = \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0\epsilon_3} \sum_{m=0}^{\infty} d_m^{(3)} D_m^{(3)} \exp[j d_m^{(3)} z] \cos\left[\frac{m\pi}{L-a_2} (x-a_2)\right] = \\ & = \frac{1}{j\omega_0\epsilon_0\epsilon_3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} d_m^{(3)} D_m^{(3)} c_{nm} \exp[j d_m^{(3)} z] \exp[j\beta_n x], \text{ при } z=0, \end{aligned}$$

$$j\gamma_0 \exp[-j\beta_0 x] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} -j\gamma_n A_n \exp[j\beta_n x] = \frac{1}{\epsilon_3} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} d_m^{(3)} D_m^{(3)} c_{nm} \exp[j\beta_n x],$$

$$j\gamma_n A_n + \frac{1}{\epsilon_3} \sum_{m=0}^{\infty} d_m^{(3)} D_m^{(3)} c_{nm} = \delta_{n,0} j\gamma_0.$$

Итак, при сшивании E_x - компоненты поля получаем следующие уравнения:

$$j\gamma_n A_n - \frac{1}{\epsilon_2} \sum_{m=0}^{\infty} d_m^{(2)} D_m^{(2)} b_{nm} \sin[d_m^{(2)} h] = \delta_{n,0} j\gamma_0,$$

$$j\gamma_n A_n + \frac{1}{\epsilon_3} \sum_{m=0}^{\infty} d_m^{(3)} D_m^{(3)} c_{nm} = \delta_{n,0} j\gamma_0.$$

Редуцированная система уравнений, полученная при сшивании касательной компоненты электрического поля, имеет вид:

$$j\gamma_n A_n - \frac{1}{\epsilon_2} \sum_{m=0}^{M_2-1} d_m^{(2)} D_m^{(2)} b_{nm} \sin[d_m^{(2)} h] = \delta_{n,0} j\gamma_0, \quad n = -N_1 \div N_2,$$

$$j\gamma_n A_n + \frac{1}{\epsilon_3} \sum_{m=0}^{M_3-1} d_m^{(3)} D_m^{(3)} c_{nm} = \delta_{n,0} j\gamma_0, \quad n = -N_1 \div N_2$$

$$M = M_2 + M_3 = N_1 + N_2 + 1.$$

Объединив системы уравнений, полученных при сшивании касательных компонент магнитного и электрического поля на границах областей (1, 2) и (1, 3), получим окончательную редуцированную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитуд пространственных гармоник Флоке A_n рассеянного поля в области 1 и амплитуд волноводных мод в областях 2 и 3, $D_m^{(2)}$ и $D_m^{(3)}$, соответственно:

$$A_n - \sum_{m=0}^{M_2-1} D_m^{(2)} b_{nm} \cos[d_m^{(2)} h] = -\delta_{n,0}, \quad n = -N_1 \div N_2,$$

$$A_n - \sum_{m=0}^{M_3-1} D_m^{(3)} c_{nm} = -\delta_{n,0}, \quad n = -N_1 \div N_2,$$

$$j\gamma_n A_n - \frac{1}{\epsilon_2} \sum_{m=0}^{M_2-1} d_m^{(2)} D_m^{(2)} b_{nm} \sin[d_m^{(2)} h] = \delta_{n,0} j\gamma_0, \quad n = -N_1 \div N_2,$$

$$j\gamma_n A_n + \frac{1}{\epsilon_3} \sum_{m=0}^{M_3-1} d_m^{(3)} D_m^{(3)} c_{nm} = \delta_{n,0} j\gamma_0, \quad n = -N_1 \div N_2,$$

$$M = M_2 + M_3 = N_1 + N_2 + 1.$$

Задача возбуждения

Рассмотрим модель фазированной антенной решетки состоящей из 16 волноводных элементов, фрагмент которой изображен на рис. 3.

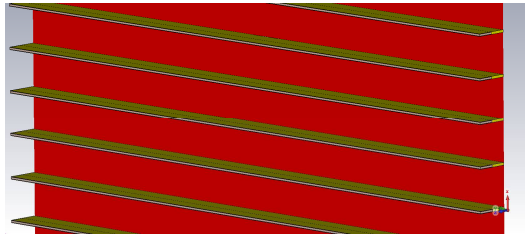


Рис. 3. Фрагмент модели апертуры фазированной антенной решетки

Здесь мы решали задачу возбуждения, для того чтобы выбрать оптимальные размеры геометрии решетки, оптимальный шаг, оптимальный размер четвертьволнового кармана. Считали поле в дальней зоне начиная с частоты 11

ГГц с шагом 0,5 ГГц. Расчеты производились только для основной моды каждого порта. Волноводы были запитаны с вертикальной поляризацией. Так как антенная решетка является симметричной, то будет достаточно посчитать результаты только для первых 8 портов.

В первую очередь рассмотрим коэффициент отражения портов по первой моде. Для этого необходимо подать сигнал на первый вход и посмотреть отражение с этого же входа. Далее аналогично подаем сигнал на второй вход и смотрим отражение со второго входа. И так для всех восьми портов. Результаты измерений изображены на рис. 4.

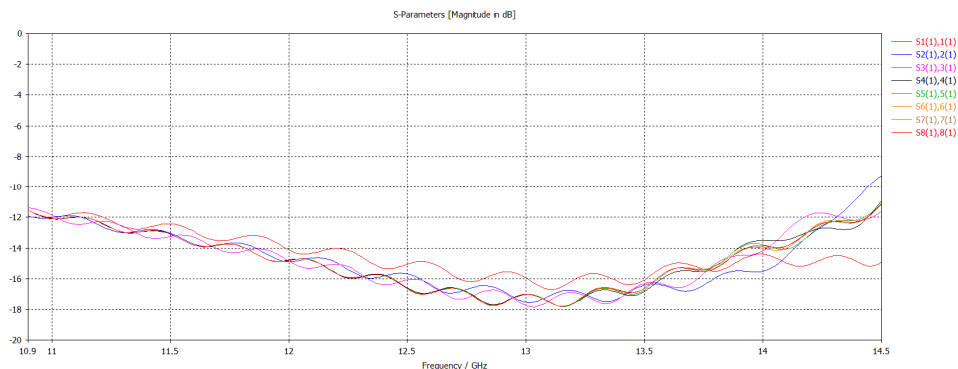


Рис. 4. Коэффициенты отражения от входов 1-8 по основной моде (TEM)

Чтобы антенная решетка хорошо работала, её антенные элементы должны быть достаточно хорошо развязаны относительно друг друга, т.е. не иметь взаимного влияния. Это необходимо для того чтобы не было так называемого ослепления решетки. Если связь между элементами сильная (хуже чем -15 дБ), то объемная волна интерферирует с поверхностной волной, в результате волны будут друг друга подавлять. При появлении эффекта ослепления антенной

решетки, антенная решетка прекращает работать правильно.

Построим график изоляции входов элементов антенной решетки по основной моде (рис. 5) и посмотрим коэффициент передачи между первым портом на основной моде и другими портами 2,3,4...8, то есть развязку портов. Также посмотрим тенденцию изменения изоляции с ростом частоты.

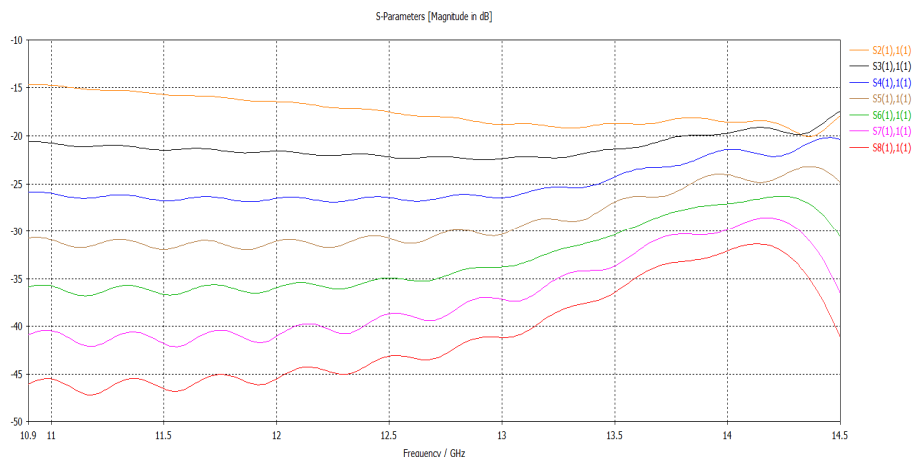


Рис. 5. Изоляция входов элементов антенной решетки по основной моде (TEM)

Мы видим, что изоляция между портами не хуже чем -15 дБ, а с ростом частоты изоляция имеет тенденцию, показанную на рис. 5.

Далее было проведено исследование возникновения высших мод, распределение по модам. Результаты исследования показаны на рис. 6.

Подаем сигнал на первый вход на первой моде и смотрим на первом входе 2,3,4...10 моду. Четные моды несравнимо малы с нечетными, поэтому можно ограничиться только нечетными модами.

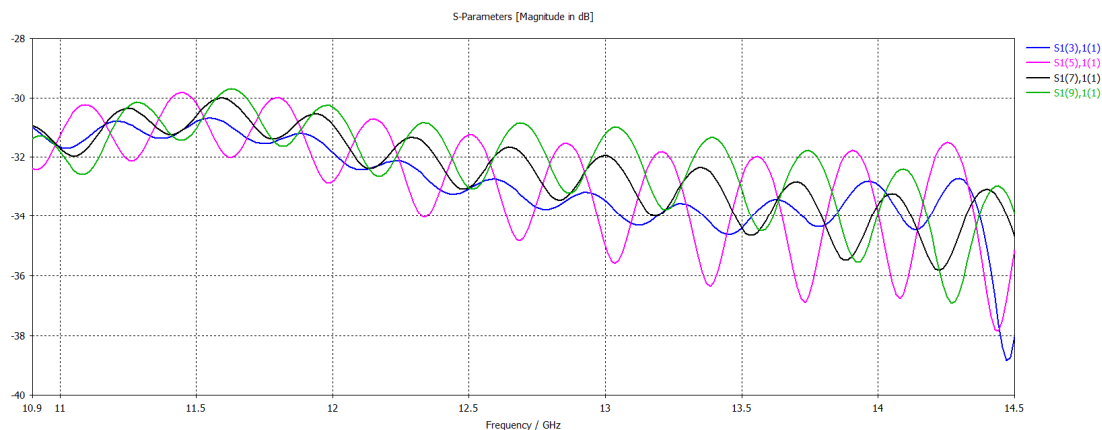


Рис. 6. Иллюстрация уровня возбуждаемых высших мод при подаче на вход 1 антенной решетки основной моды (ТЕМ)

Также были построены диаграммы направленности (рис. 7) каждого элемента антенной решетки (1 элемент, 2,3,...8) на частоте 11 ГГц. Восьмой элемент антенной решетки расположен по центру, а первый элемент на краю. Поэтому диаграмма направленности первого элемента получилась не симметричная. У восьмого элемента диаграмма направленности наоборот практически осисимметричная, т.е. по

основному лепестку максимум расположен строго по центру. Из рис. 7 четко видно, что по мере приближения к центру антенной решетки диаграмма направленности становится симметричной. Также мы видим, что диаграмма направленности достаточно широкая, следовательно, сектор сканирования при падении коэффициента на 3дБ составляет $\pm 50^\circ$.

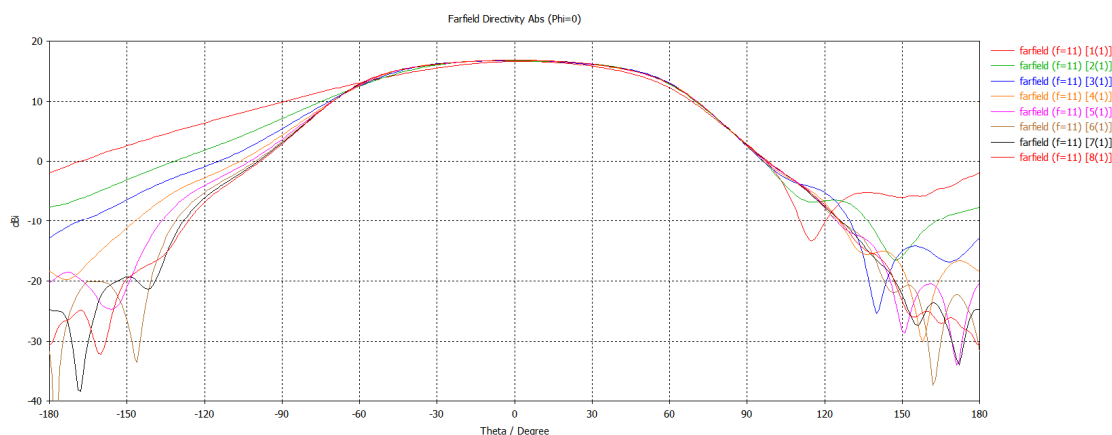
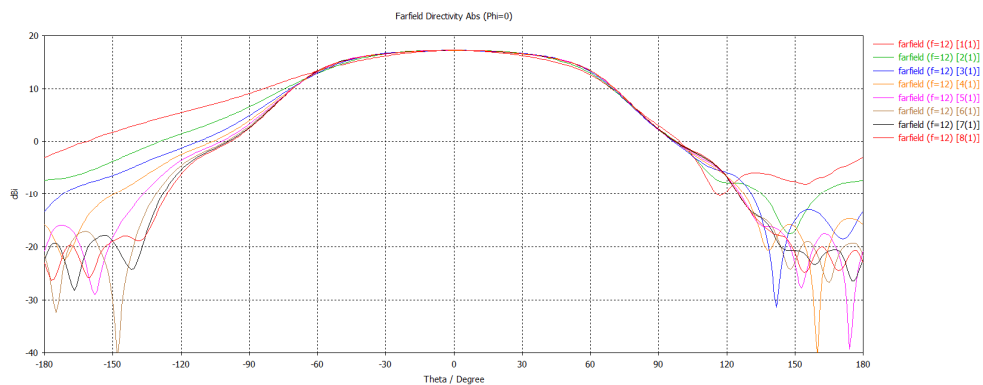


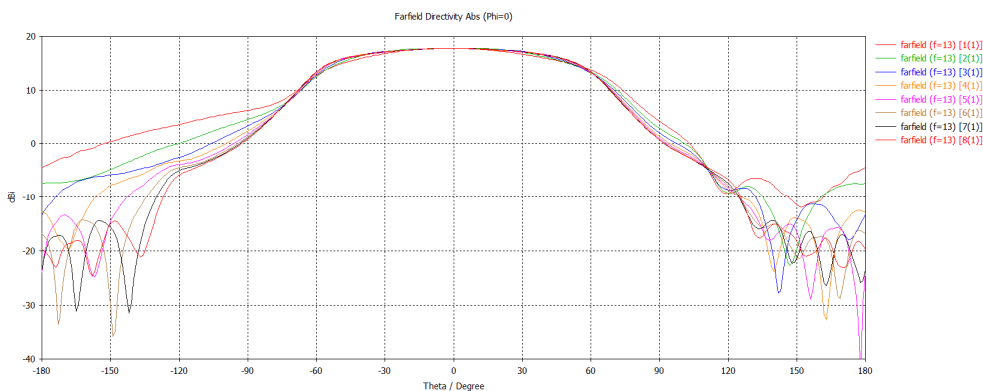
Рис. 7. ДН в угло-местной плоскости крайнего элемента решетки 1, 2, 3, ..., и 8, расположенного ближе к центру решетки на частоте 11 ГГц

Рассмотрим диаграммы направленности на

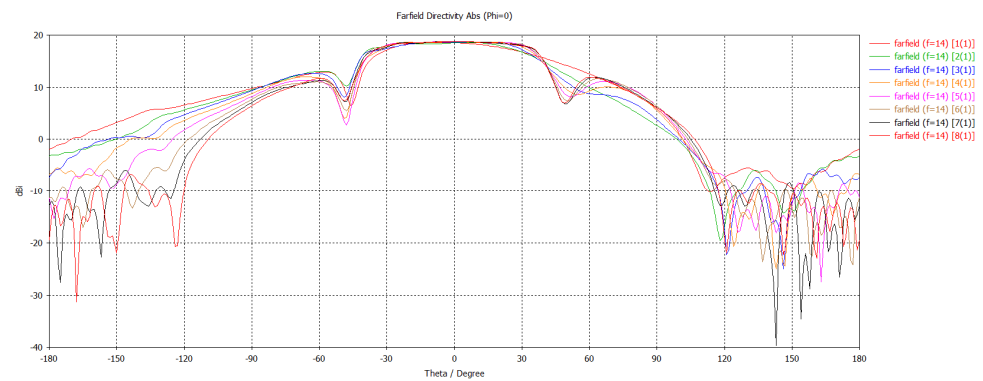
других частотах 12,13,14,14,5 ГГц (рис. 8).



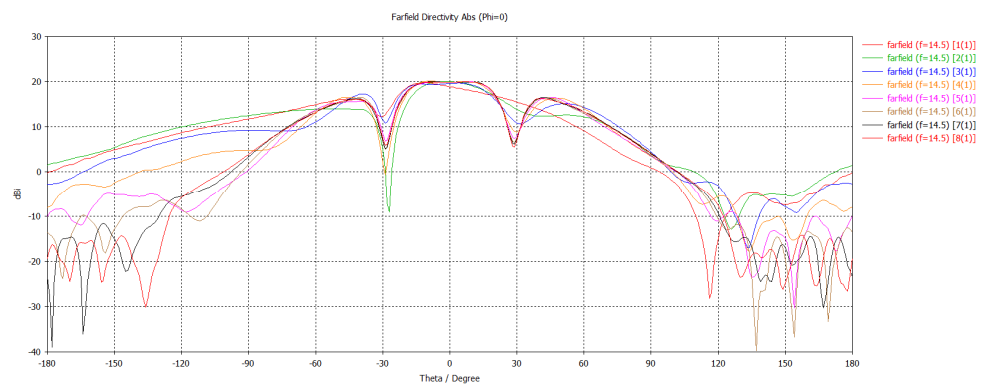
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. ДН в угло-местной плоскости крайнего элемента решетки 1, 2, 3, ..., и 8, расположенного ближе к центру решетки на частотах: а) 12 ГГц; б) 13 ГГц; в) 14 ГГц; г) 14.5 ГГц

На частотах 14 и 14.5 ГГц виден эффект ослепления ФАР, проявляющийся в появлении глубоких провалов в результате интерференции объемной и поверхностных волн. Сектор сканирования в результате эффекта ослепления сузился до $\pm 20^\circ$.

Заключение

В результате измерений мы подтвердили, что геометрические параметры модели антенной решетки были выбраны оптимально.

Литература

1. Пастернак Ю.Г. Автоматизация проектирования мобильных антенных решеток на основе моделирования и

оптимизации дифракционных структур: дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.12. Воронеж, 2000. 287 с.

2. Шестопалов В.П., Кириленко А.А., Масалов С.А. Матричные уравнения типа свертки в теории дифракции. Киев: Наукова думка. 1984. 296 с.

3. Митра Р., Ли С. Аналитические методы в теории волноводов. М.: Мир. 1974. 327 с.

4. Ильин В.А., Э.Г. Позняк: Основы математического анализа. М.: Наука. Физматлит, 1998. Ч. II. 448 с.

5. Останков А.В. Многолучевая антенна с гребенчатым рефлектором // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 73-80.

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

7. Математическое моделирование дифракции плоских ЭМВ на многопазовых гребенках методом пазовых мод / А.И. Климов, К.Б. Меркулов, А.В. Останков, Ю.Г. Пастернак, В.И. Юдин // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж, 1999. С. 138-145.

Поступила 24.09.2020; принята к публикации 21.12.2020

Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84); ведущий инженер, АО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21); e-mail: pasternakyg@mail.ru

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

Сафонов Кирилл Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Safonov-kirik@mail.ru

MATHEMATICAL MODEL OF THE RADIATING APERTURE OF HEADLIGHTS CONSISTING OF SEGMENT-PARABOLIC ANTENNAS

Yu.G. Pasternak^{1,2}, V.A. Pendyurin³, K.S. Safonov²

¹JSC "IRKOS", Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

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

Abstract: the solution of the communication problem in the Arctic, as well as in the tundra, in the taiga, in the forest, in the sea, in the fields is possible only with the use of mobile satellite communication systems. FSUE "Space Communications" (Moscow) has a constantly expanding group of satellites. For reliable communication in the Arctic and Northern latitudes, in addition to geostationary satellites, satellites moving along high-orbit trajectories were launched. To switch from one satellite to the other included in the subscriber's visibility area, it is necessary to use antenna arrays. The problem is that currently there are no mobile terminals for high-speed satellite communication, and the cost of foreign analogues prevents their widespread use (up to 50 thousand dollars). Typically, a phased array radar is used to track thousands of corner points to track hundreds of targets. Such requirements can only be met by scanning the beam in space for a microsecond. It is clear, that electronic beam control is necessary since it is not possible to mechanically rotate the antenna. Only some of the above problems will be touched upon in this article. An electronic model of the antenna array and its mathematical model is presented

Key words: mathematical model of the antenna array, segment-parabolic antenna

References

1. Pasternak Yu. G. "Automation of design of mobile antenna arrays on the basis of modeling and optimization of diffractive structures" ("Avtomatizatsiya proektirovaniya mobil'nykh anten'nykh reshetok na osnove modelirovaniya i optimizatsii difraktsionnykh struktur"), Dr. of Technical Sci. diss., 05.13.12, Voronezh, 2000, 287 p.

2. Shestopalov V.P., Kirilenko A.A., Masalov S.A. "Convolution-type matrix equations in the theory of diffraction" ("Matrichnye uravneniya tipa svertki v teorii difraktsii"), Kiev, Naukova dumka, 1984, 296 p.

3. Mittra R., Li S. "Analytical methods in the theory of waveguides" ("Analiticheskie metody v teorii volnovodov"), Moscow, Mir, 1974, 327 p.

4. Il'in V.A., Poznyak E.G. "Fundamentals of mathematical analysis" ("Osnovy matematicheskogo analiza"), part II, Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1998, 448 p.
5. Ostankov A.V. "Multibeam antenna with comb reflector", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 73-80.
6. Korn G., Korn T. "Handbook of mathematics for scientists and engineers" ("Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov"), Moscow, Nauka, 1973, 832 p.
7. Klimov A.I., Merkulov K.B., Ostankov A.V., Pasternak Yu.G., Yudin V.I. "Mathematical modeling of the diffraction of flat EMEs on multi-slot combs by the method of pause modes", *Problems of Ensuring the Reliability and Quality of Devices and Systems: Interuniversity Scientific Papers (Problemy obespecheniya nadezhnosti i kachestva priborov, ustroystv i sistem: Mezhvuz. sb. nauch. tr.)*, Voronezh, 1999, pp. 138-145.

Submitted 24.09.2020; revised 21.12.2020

Information about the authors

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Leading Engineer of JSC "IRKOS" (21, Zvezdnyy avenue, Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

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

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

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ БЛОЧНЫХ КОДОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОВЕРОЧНЫХ МАТРИЦ

А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова, О.В. Свиридова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: для итеративного декодирования на графах используется новый альтернативный подход - это стохастическое декодирование. Возможность стохастического декодирования была недавно предложена для декодирования LDPC-кодов. Эта статья расширяет применение стохастического подхода для декодирования линейных блочных кодов с помощью проверочных матриц (PCM), таких как коды Боуза – Чоудхури – Хоквингема (BCH), коды Рида – Соломона (RS) и блочные турбокоды на основе компонентов кодов BCH. Показано, как стохастический подход способен генерировать информацию мягкого выхода для итеративного декодирования с мягким входом и мягким выходом Soft - Input Soft - Output (SISO). Описывается структура стохастических переменных узлов высокой степени, используемых в кодах с помощью проверочных матриц PCM. Результаты моделирования для кода BCH (128, 120), кода RS (31, 25) и RS (63, 55) и турбокода блока BCH (256, 121) и (1024, 676) демонстрируют эффективность декодирования при закрытии к итеративному декодеру SISO с реализацией с плавающей запятой. Эти результаты показывают производительность декодирования, близкую к адаптивному алгоритму распространения доверия и/или турбо-ориентированному адаптированному алгоритму распространения доверия

Ключевые слова: стохастическое декодирование, низкоплотностный декодер, проверочная матрица

Введение

Итеративное декодирование SISO было впервые введено в 1993 году для турбо-декодирования каскадных сверточных кодов, чтобы обеспечить производительность, приближающуюся к пределу пропускной способности Шеннона. С тех пор концепция декодирования SISO была расширена для декодирования различных классов кодов, исправляющих ошибки, таких как LDPC коды. Хорошо известный алгоритм распространения доверия (BP) также является итеративным на основе SISO алгоритма для декодирования линейных блочных кодов. Этот алгоритм является основным алгоритмом декодирования LDPC. В алгоритме распространения доверия информация в форме вероятностных сообщений распространяется между проверочными узлами, соединенными ребрами факторного графа, который определяется проверочной матрицей (PCM) кода. Распространение информации в BP может осуществляться параллельно. Этот присущий параллелизм вместе с превосходной производительностью кодов LDPC сделали LDPC-декодеры привлекательными для недавних приложений с высокой скоростью передачи данных в цифровой связи.

Стохастическое декодирование - это новый подход к декодированию кодов с исправлением ошибок. Этот подход основан на стохастических вычислениях, где операции над вероятностями

выполняются последовательно на потоках случайно сгенерированных стохастических битов. Двумя основными особенностями этого подхода для итеративного декодирования являются очень простые аппаратные структуры проверочных узлов и значительно сниженные требования к маршрутизации и соединению. Эти особенности дают большой потенциал для декодирования с низкой сложностью и/или высокой пропускной способностью. Ранние стохастические методы были успешны только для декодирования специальных коротких кодов Хемминга. И также стохастические методы будут успешны и для декодирования (256,121) блочного турбокода на основе ациклических (16,11) компонентных декодеров Хемминга. Эти методы приводят к низкой производительности декодирования, когда используются для декодирования практических кодов на факторных графах (с циклами). Недавно был предложен новый стохастический метод, который показывает, что стохастическое декодирование способно обеспечить почти оптимальную производительность для декодирования практических кодов LDPC относительно BP с плавающей точкой. Возможности этого метода для декодирования с низкой сложностью недавно были подтверждены реализацией на ПЛИС (1024,512) LDPC декодера. Эта реализация обеспечивает пропускную способность 706 Мбит/с, если вероятность битовой ошибки (BER) 10^{-6} . При этом потери производительности составляют около 0,1 дБ по сравнению с BP с плавающей точкой, занимая только 36% устройства Virtex-4 LX200.

Стохастическое декодирование

При использовании последовательностей Бернулли в стохастическом декодировании полученные вероятности преобразуются в потоки стохастических битов. При этом каждый бит в потоке преобразуется и становится равным «1». В результате данного преобразования возможны разные стохастические потоки, вероятность которых равна 0,6875 (рис. 1). Это объясняется тем, что в каждом потоке 11 бит из 16 бит будут равняться «1». Также в стохастических потоках кадринг не требуется.

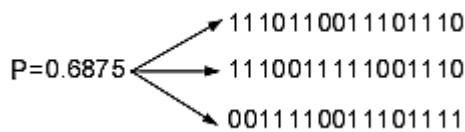


Рис. 1. Некоторые возможные стохастические потоки с вероятностью 0,6875

Простота стохастических вычислений удобна для итеративного декодирования, основанного на графе, такого как ВР-декодирование. Стохастическое представление приводит к упрощению структуры проверочных узлов и, что более важно, благодаря своей бит-последовательной природе, уменьшает перегрузку маршрутизации, связанную с реализацией алгоритма декодирования на основе ВР, такого как LDPC-декодеры. Это связано с тем, что для представления ребра на графе требуется только один провод в каждом направлении. Пусть стохастические битовые потоки $\{a_i\}$ и $\{b_i\}$ представляют входные вероятности $P_a = \Pr(a_i = 1)$ и $P_b = \Pr(b_i = 1)$, соответственно, и $\{c_i\}$ представляют выходную вероятность $P_c = \Pr(c_i = 1)$. На рис. 2 показаны эквивалентные структуры для переменного узла (VN) степени 3 ($d_v = 3$) и проверочного узла четности (PN) степени 3 ($d_c = 3$). Переменный узел, показанный на рис. 2, находится в состоянии удержания (то есть $c_i = c_{i-1}$), когда входные биты не равны ($a_i \neq b_i$). Выходные биты VN, которые не генерируются в состоянии удержания, называются регенеративными битами. Регенерирующие биты важны для правильного стохастического декодирования. Стохастическое декодирование продолжается посредством VN и PN, обменивающихся битами вдоль ребер в факторном графе. Каждый цикл стохастического декодирования называется циклом декодирования. Цикл декодирования относится к обмену одним битом между VN и PN по ребрам фактор-

ного графа и, следовательно, не соответствует непосредственно одной итерации в ВР.

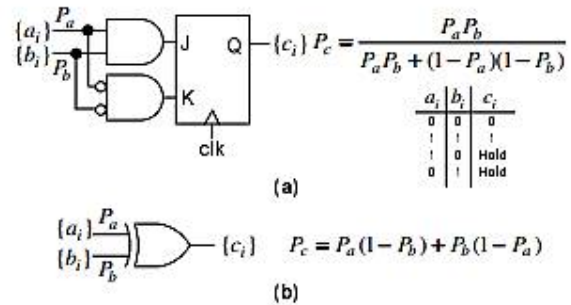


Рис. 2. Стохастический переменный узел (a) и проверочный узел (b)

Бинарная проверочная матрица кода RS или BCH представляет собой матрицу в факторном графе с VN и PN высокой степени (со степенями, намного превышающими степень узлов в кодах LDPC). Например, факторный граф (63,55) кода RS, используемый в этой статье, имеет 378 VN и 48 PN над GF(2⁶). Максимальные степени VN и PN составляют 34 и 184, соответственно, и около 77% VN имеют $d_v \geq 20$. В адаптивном алгоритме распространения доверия (ABP) сложность узлов высокой степени высока, а проверочная матрица (PCM) предъявляет сложные требования к маршрутизации. Например, используя 8-битную точность для вероятностей в ABP, для факторного графа кода RS требуется более 127 тысяч проводов для представления ребер в двух направлениях. Стохастический подход предлагает узлы с низкой сложностью и значительно облегчает требования к маршрутизации. При использовании этого подхода для кода RS (63,55) требуется около 16 тысяч проводов. Стохастический метод, применяемый для декодирования линейных блочных кодов высокой плотности, использует NDS и EM. Кроме того, благодаря узлам высокой степени и этапу адаптации PCM в ABP и TAB (турбо-ориентированный алгоритм распространения доверия) он использует новые стохастические методы, которые обсуждаются ниже.

Стохастические переменные узлы высокой степени

Построение стохастических проверочных узлов PN высокой степени просты и основаны на входных битах XOR (исключающее ИЛИ). Однако ситуация для переменных узлов VN высокой степени отличается из-за состояния удержания. Для надлежащей производительности деко-

дирования важно, чтобы стохастический VN высокой степени был построен на основе подграфов стохастических VN низкой степени (например, с $d_v \leq 4$ подузлами). Чтобы уточнить, рассмотрим структуру стохастического VN на рис. 3 (а) с произвольным d_v . Эта стохастическая структура не подходит для VN высокой степени. Это потому, что эта структура полностью находится в состоянии удержания, когда любые два входных бита не равны. Следовательно, при использовании этой структуры вероятность нахождения в состоянии удержания увеличивается с увеличением d_v . Повышенная вероятность состояния удержания для VN уменьшает регенеративные биты, распространяющиеся в графе, и приводит к меньшей коммутационной активности в графе и, следовательно, ухудшенной производительности стохастического декодирования. Это явление может быть очень разрушительным, когда биты во входных стохастических потоках VN в основном равны «0» (или «1»). Эти проблемы менее вероятны для стохастической структуры, показанной на рис. 3 (b), которая построена на основе $d_v = 3$ подузлов (с 1-битной памятью). Это связано с тем, что при наличии стохастических входных битов, которые в основном равны «0» (или «1»), вероятность состояния удержания для пунктирного выходного подузла на рис. 3 (b) намного меньше. Следовательно, менее вероятно, что весь узел находится в состоянии удержания. На рис. 3 (b) ЕМ используется только для выходного фронта выхода. На рис. 4 показан пример, который сравнивает усредненный процент состояния удержания между двумя $d_v = 9$ VN на основе структур рис. 3 (а) и (b) для случая, когда P_1 изменяется и $P_2 = P_3 = \dots = P_8 = 0,9$.

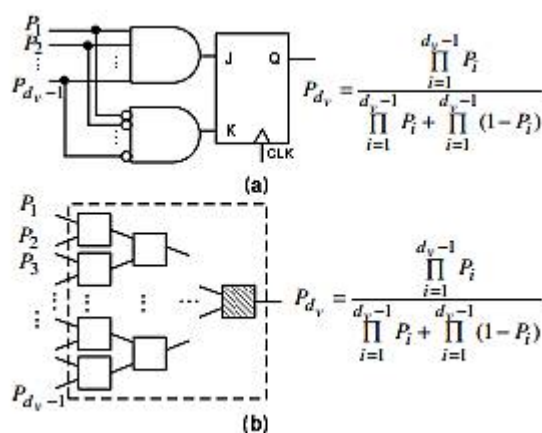


Рис. 3. Структура, которая не подходит для VN высокой степени (а), пример построения VN высокой степени на основе подузлов низкой степени (b)

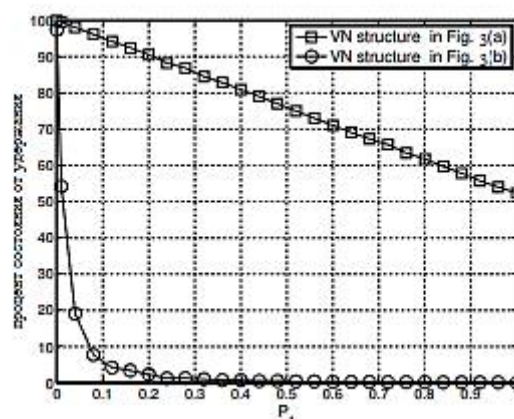


Рис. 4. Процент удержаний на выходных битах двух $d_v = 9$ VN, основанных на структурах на рис. 3 (а) и (b), P_1 изменяется и $P_2 = P_3 = \dots = P_8 = 0,9$

Представление информации мягкого выхода

АВР и ТАВ основаны на адаптации РСМ на основе надежности. Оба эти шага используют информацию мягкого выхода, предоставленную ВР. Поскольку декодеры на основе ВР по своей природе работают с надежностями, они могут быть легко включены в схему адаптации и обновления. Эта ситуация, однако, отличается для методов стохастического декодирования. Стохастические методы преобразуют надежность канала в стохастические битовые потоки, и декодирование полностью выполняется последовательным образом. Для включения с обновлением надежности и этапами адаптации важно, чтобы метод стохастического декодирования предоставлял информацию с мягким выходом. Для этой цели мы предлагаем использовать насыщающие счетчики вверх/вниз для представления информации с мягким выходом. В этом методе счетчик назначается каждому VN. Счетчик может быть инициализирован, чтобы содержать нулевое значение. Счетчик увеличивается, если соответствующий выход VN равен «1», если счетчик не достиг своего максимального предела (+U). Точно так же, когда выходной сигнал VN равен «0», счетчик уменьшается, если он не достиг своего минимального предела (-U). После нескольких DC содержимое счетчиков может быть преобразовано в мягкую информацию, и могут быть выполнены этапы обновления LLR и адаптации РСМ.

Пусть V будет значением насыщающего счетчика вверх/вниз, связанного с VN ($-U \leq V \leq +U$). Это значение может быть преобразовано в мягкую информацию в области вероятности как $P_{\text{ext}} = (V + U) / 2U$. Следовательно, соответствующая внешняя LLR VN

$$L_{ext} = \ln \left(\frac{P_{ext}}{1-P_{ext}} \right) = \ln \left(\frac{U+V}{U-V} \right),$$

где $\ln(\cdot)$ указывает на операцию натурального логарифма. Следует отметить, что содержимое счетчиков насыщения может также использоваться для метода HDD, используемого при декодировании RS. В этом случае жесткое решение применяется к V. Это использование аналогично предыдущему использованию счетчиков вверх/вниз, где знаковый бит счетчика определяет сложное решение.

Таким образом, бит знака «0» указывает решение -1, а бит знака «1» указывает решение +1 для передачи BPSK (двоичная фазовая манипуляция).

В этой статье представлены характеристики BER или частоты ошибок по кадрам (FER) линейных блочных кодов. Что касается кодов BCH, рассматриваются расширенные коды BCH, поскольку они более эффективны, чем нерасширенные коды. Передача BPSK с $\gamma = 6$ и средней энергией бита E_b по каналу AWGN предполагается для каждого моделирования. Шаг адаптации PCM для кодов BCH и RS выполняется на основе ABP. Этот этап для блочных турбокодов выполняется на основе TAB.

Коды Боуза – Чоудхури – Хоквингема

Показатель BER (128,120) кода BCH показан на рис. 5. Для этого кода успешно используются три метода декодирования: ABP, декодирование с оценкой апостериорного максимума (MAP) и стохастическое декодирование. Для сравнения также построены некодированные кривые BPSK и нижняя граница максимального правдоподобия (ML). Значения коэффициента демпфирования и количества приспособлений $\lambda = 0,2$ и $I_{max} = 5$. Длина $M = 25$ используется для предложенного метода стохастического декодирования. Стохастическое декодирование выполняется для фиксированного числа 1K DC (циклическое декодирование). Никакого значительного отклонения BER не наблюдается для (128,120) кодов BCH между стохастическим декодированием и ABP с плавающей точкой. Этот результат также наблюдался для других кодов BCH (не показаны). MAP-декодирование превосходит эти два метода примерно на 0,25 дБ при BER 10^{-6} и достигает асимптотической границы.

Однако MAP-декодирование этого кода BCH требует решетки с 256 состояниями и 128 секциями, что слишком сложно для реализации.

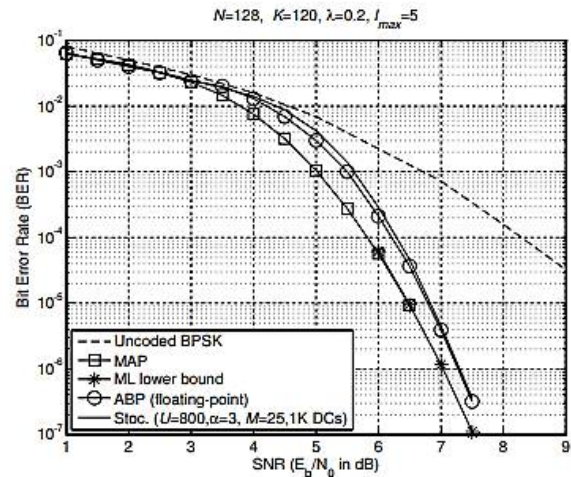


Рис. 5. Результаты моделирования для (128,120) BCH кода

Коды Рида – Соломона

Рис. 6 и 7 соответственно показывают результаты моделирования, полученные для (31,25) и (63,55) кодов RS над $GF(2^5)$ и $GF(2^6)$. На каждом рисунке показаны характеристики FER для алгебраического метода жесткого решения, ABP и метода стохастического декодирования. Значение коэффициента демпфирования и количества адаптаций для кода RS (31,25) составляют $\lambda = 0,05$ и $I_{max} = 20$, а для кода RS (63,55) они равны $\lambda = 0,12$ и $I_{max} = 5$. Длина EM $M = 50$ и $M = 64$ используются для декодирования кода (31,25) и кода (63,55) соответственно. Стохастическое декодирование выполняется для DC 1K между каждой адаптацией для кода RS (31,25) и для кода (63,55) оно выполняется для DC 2K между каждой адаптацией PCM. Потеря производительности для кода (31,25) составляет около 0,1 дБ при FER 3×10^{-5} , а для кода (63,55) - около 0,13 дБ при FER 5×10^{-5} .

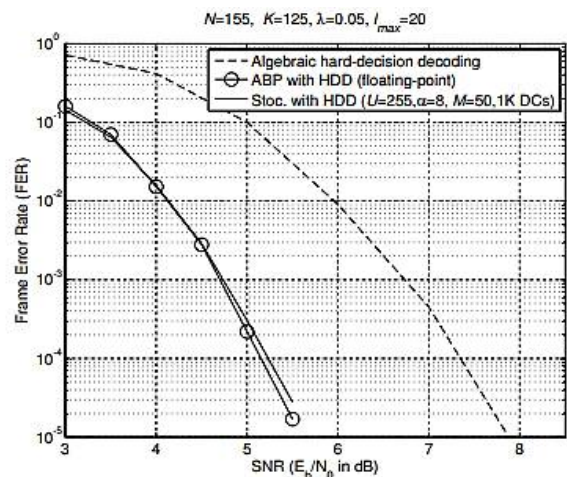


Рис. 6. Результаты моделирования для кода RS (31,25) над $GF(2^5)$

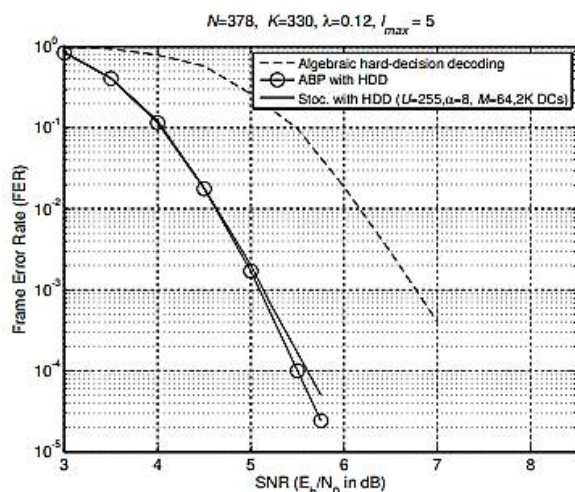


Рис. 7. Результаты моделирования для кода RS (63,55) над GF (2⁶)

Блочные турбокоды на основе Боуза – Чоудхури – Хоквингема

Результаты для (256,121) блочного турбокода на основе (16,11) компонентных декодеров BCH и (1024,676) блочного турбокода на основе (32,26) компонентных декодеров BCH показаны на рис. 8 и 9. Для турбодекодирования этих кодов традиционный алгоритм (CP) Чейза Пиндиха (с 6 глобальными итерациями и 16 шаблонами ошибок), ТАВ и метод стохастического декодирования (применяемые к алгоритму ТАВ) последовательно используются для алгоритма декодирования SISO во время итерационного процесса. Необходимо обратить внимание, что только 3 локальных итерации необходимы во время процесса BP алгоритма ТАВ и 6 глобальных итераций достаточно для двух методов декодирования, основанных на алгоритме ТАВ. Кроме того, для алгоритма ТАВ не требуется коэффициент демпфирования. Вместо этого уменьшение внешнего информационного эффекта делается во время вычисления мягкой информации. Длина EM $M = 25$ и $M = 40$ используются для (256,121) и (1024,676) блочных турбокодов соответственно. Для обоих кодов используется фиксированное количество 1K DC. Для турбокода (256,121) результаты для ТАВ с плавающей запятой и метода стохастического декодирования близки и показывают потери при декодировании около 0,1 дБ по сравнению с классическим CP-декодированием при 10^{-6} BER. Для турбокода (1024, 676) потери при декодировании стохастического декодирования при 10^{-6} BER составляют примерно 0,1 дБ и 0,3

дБ по сравнению с ТАВ с плавающей запятой и CP-декодированием соответственно.

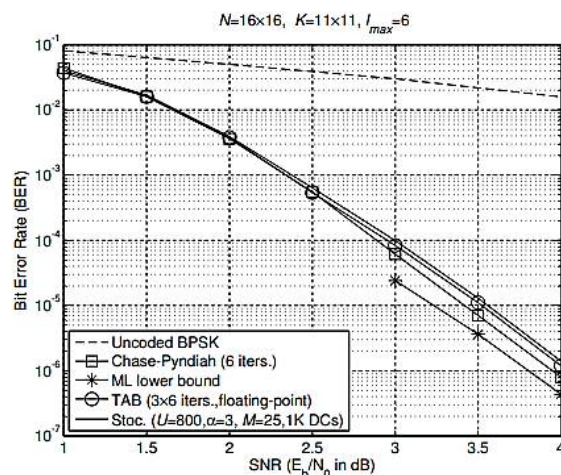


Рис. 8. Результаты моделирования для кода (256,121) блочного турбокода на основе BCH

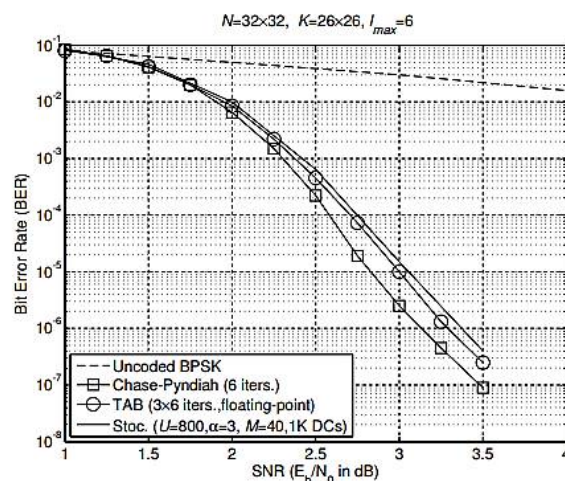


Рис. 9. Результаты моделирования для кода (1024, 676) блочного турбокода на основе BCH

Заключение

Данная статья расширяет применение стохастического декодирования на важные классы BCH, RS и блочных турбокодов. Результаты моделирования, представленные для стохастического декодирования этих кодов, показывают производительность, близкую к АВР и/или ТАВ с плавающей запятой. Следует отметить, что стохастическое декодирование также может предложить компромиссы сложности и производительности. Например, можно компенсировать длину EM или количество DC с временем декодирования и/или производительностью. Тем не менее стохастическое декодирование открывает интересные исследовательские возможности.

Литература

1. Галлагер Р.Дж. Коды с малой плотностью проверок на четность. М.: Мир, 1996. 90 с.
2. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: учеб. пособие; под ред. Ю.Б. Зубарева. М.: Справочное издание, 2004. 126 с.
3. Остроумов И.В., Свиридова И.В., Башкиров А.В. Принципы построения турбо кодов // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума, 2012. Т. 1. С. 362-363.
4. Башкиров А.В., Свиридова И.В., Муратов А.В. Эффективное многопороговое декодирование двоичных кодов с предварительной оценкой ошибочности проверок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 3. С. 99-101.
5. Помехоустойчивый алгоритм декодирования ортогональных пространственно-временных блочных кодов систем ММО в замирающих каналах связи / О.Н. Чирков, И.С. Бобылкин, И.В. Свиридова, А.А. Матвеев, М.И. Соболев // Надежность и качество: тр. международного симпозиума. 2019. Т. 2. С. 90-92.

Поступила 23.09.2020; принята к публикации 21.12.2020

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Свиридова Ирина Владимировна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>
Хорошайлова Марина Владимировна – ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>
Свиридова Ольга Владимировна – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: s.lelya.15@mail.ru

STOCHASTIC DECODING OF LINEAR BLOCK CODES USING CHECK MATRIX

A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, M.V. Khoroshaylova, O.V. Sviridova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: stochastic decoding capability has recently been proposed for decoding LDPC codes. This paper expands on the application of the stochastic approach to decoding linear block codes using parity check matrices (PCMs) such as Bose-Chowdhury-Hawkingham (BCH) codes, Reed-Solomon (RS) codes, and BCH component-based block turbo codes. We show how the stochastic approach is able to generate soft-output information for iterative decoding with soft-input and soft-output Soft-Input Soft-Output (SISO). We describe the structure of high degree stochastic node variables used in codes using PCM parity check matrices. Simulation results for BCH code (128, 120), RS code (31, 25) and RS (63, 55), and BCH block turbo code (256, 121) and (1024, 676) demonstrate the decoding efficiency on close to SISO iterative decoder with floating point implementation. These results show decoding performance close to the adaptive trust propagation algorithm and / or turbo-oriented adapted trust propagation algorithm

Key words: stochastic decoding, low-density decoder, check matrix

References

1. Gallager R.J. "Codes with a low density of parity checks", Moscow, Mir, 1996, 90 p.
2. Zolotaryev V.V., Ovechkin G.V. "Noise-resistant coding. Methods and algorithms" ("Pomekhoustoychivoe kodirovanie. Metody i algoritmy"), textbook, ed. Yu.B. Zubarev, Moscow, Spravochnoe izdanie, 2004, 126 p.
3. Ostroumov I.V., Sviridova I.V., Bashkirov A.V. "Principles of building turbo codes", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, 2012, vol. 1, pp. 362-363.
4. Bashkirov A.V., Sviridova I.V., Muratov A.V. "Effective multi-threshold decoding of non-binary codes with a preliminary assessment of the error of checks", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 99-101.
5. Chirkov O.N., Bobylkin I.S., Sviridova I.V., Matveev A.A., Sobolev M.I. "Noise-resistant algorithm for decoding orthogonal space-time block codes of MIMO systems in fading communication channels", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, 2019, vol. 2, pp. 90-92.

Submitted 23.09.2020; revised 21.12.2020

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Irina V. Sviridova, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID ID - <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>
Marina V. Khoroshaylova, Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), Voronezh, Russian Federation, pmv2205@mail.ru, tel.: 8-910-732-66-13, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538
Ol'ga V. Sviridova, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: s.lelya.15@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗГИБА RFID МЕТКИ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, Е.В. Папина, К.А. Бердников, Ю.Д. Савкина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается пассивная радиочастотная метка, которая находится на гибкой подложке, что приводит к появлению проблемы с изменением характеристик при изгибе метки. В процессе исследования производилось моделирование для трех ситуаций: плоской метки, изогнутой внутрь и наружу. Благодаря современным методам электродинамического моделирования возможно определить все основные характеристики RFID метки – в активном режиме: обратные потери, диаграмму направленности; в пассивном режиме: диаграмму обратного рассеяния, токи и напряжения в нагрузке. При моделировании были построены графики зависимости амплитуд токов и напряжений в нагрузке от частоты, пиковые значения эффективной площади рассеяния. Благодаря полученным данным можно определить наиболее оптимальные частоты для облучения RFID метки, чтобы обеспечить ее работу в активном режиме (высокие токи и напряжения в нагрузке), а также в режиме обнаружения – большие значения ЭПР. Приводятся графики и таблицы для сравнения исследуемых случаев, по которым видны изменения характеристик при изгибе метки, что делает невозможным применение системы в широких диапазонах частот, так как стоит учитывать ее возможные изгибы

Ключевые слова: RFID метка, диаграмма обратного рассеяния, эффективная площадь рассеяния

Введение

Средства радиочастотной идентификации (RFID) окружают нас повсеместно, так самыми простыми их представителями являются пассивные метки, которые становятся активными лишь при их облучении электромагнитной волной. После этого в цепи индуцируются токи, которые достаточны или для обрыва участка цепи, или для активации микросхемы, которая способна передать ответный сигнал. Логическая микросхема при этом выдает изначально заложенный программный код [1], при этом коды могут обладать системой защиты от помех, что позволяет обеспечить работу, например, банковских карт [2]. На передающей (исходно излучающей) части возможна также передача кодовой комбинации [3], а пассивная RFID система способна обработать данный сигнал и послать ответный. Особенностью функционирования пассивной системы является то, что она обладает очень высокой надежностью и защищена от выхода из строя [4].

Большинство радиочастотных меток наносятся на гибкие материалы, что приводит к важности учета изгиба системы на ее характеристики. Типичным материалом-подложкой выступает простая бумага, которая способна упростить конструкцию и удешевить производство, а также различные виды пластмасс.

Основные параметры пассивных радиочастотных меток

Так как RFID метка представляет собой систему, которая состоит из антенны и логической части (микросхема, место обрыва цепи), то при ее разработке следует добиться максимально широкой диаграммы направленности, что обеспечит должный уровень эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) [5, 6]. Благодаря современным инструментам электродинамического моделирования возможно определить уровень токов в установленной нагрузке, а также зависимость данных значений от частоты.

При оптимальном выборе частот возможна реализация системы быстрого реагирования, так при облучении частотой, которая соответствует появлению максимальных значений токов в нагрузке – обрыв системы, а следовательно, ее выход из строя, если же выбрать частоту, на которой ЭПР метки максимален, то ее можно легко обнаружить, а следовательно, подать сигнал тревоги. Подобная система реализована в большинстве супермаркетов и магазинов одежды.

Основные характеристики исследуемой RFID метки

Предложенная для исследования конструкция RFID метки приведена на рис. 1.

В качестве материала проводника выступают тонкие медные проводники, а в виде ди-

электрической подложки – бумага ($\epsilon = 2,31$, толщина стандартного листа бумаги 0,1 мм – позволяет излучать в 2 стороны).

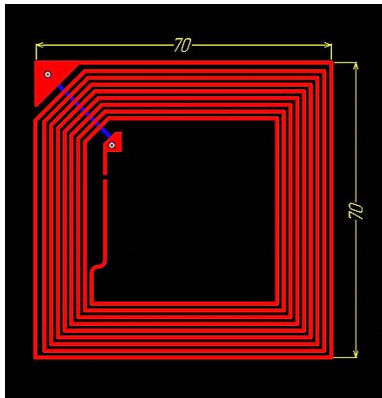


Рис. 1. Модель исследуемой RFID метки

Первоначальное моделирование производится, когда в разрыв цепи помещается дискретный порт питания с волновым сопротивлением 50 Ом, что позволяет определить S_{11} параметры метки (рис. 2), а также построить ее диаграмму направленности (рис. 3), которая должна обладать большой шириной главного лепестка.

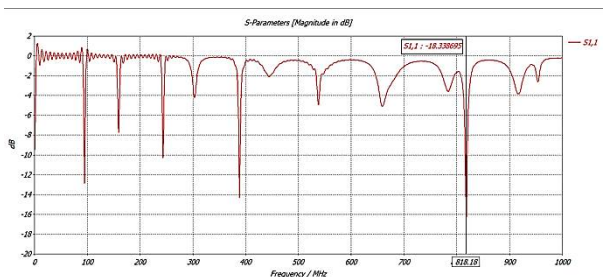


Рис. 2. S_{11} параметры RFID метки

Как видно, минимальное значение коэффициента отражения наблюдается на частоте 818,18 МГц и составляет -18,33 дБ.

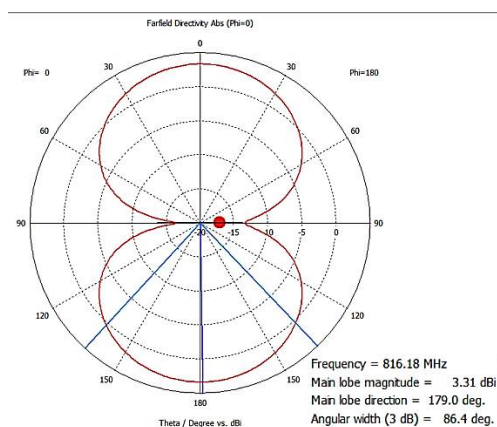


Рис. 3. Диаграмма направленности RFID метки

По полученной диаграмме направленности видно, что ширина главного лепестка составляет $86,4^\circ$, что выполняет одно из основных требований к RFID меткам.

Исследование влияния изгиба метки на ее характеристики

При проведении данного исследования рассматривались три случая: метка не изогнута; метка изогнута внутрь с радиусом изгиба 60 мм; метка изогнута наружу с радиусом 60 мм (рис. 4).

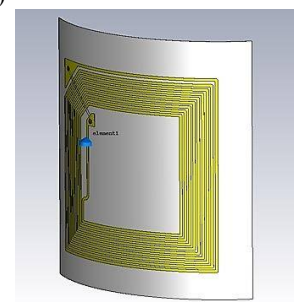
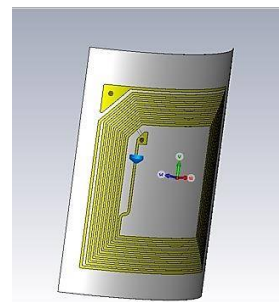
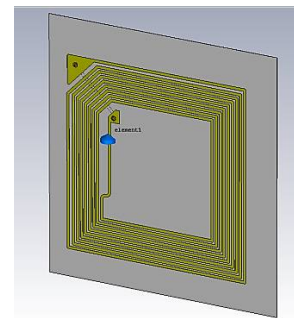


Рис. 4. Исследуемые случаи RFID меток: а) плоская метка без изгиба; б) изгиб внутрь ($R=60$ мм); в) изгиб наружу ($R=60$ мм)

Над каждой RFID меткой на высоте 25 мм помещался пробник ЭПР объекта, который позволяет изменить значение в пределах исследуемого частотного диапазона, в позицию активного компонента помещался сосредоточенный элемент с сопротивлением 50 Ом.

В процессе моделирования было замечено, что происходит изменение форм диаграмм обратного моноэтического рассеяния, амплитуд токов и напряжений.

На рис. 5 приводятся полученные картины диаграмм обратного рассеяния (ДОР); на рис. 6 приводятся значения токов в нагрузке от частоты; на рис. 7 – значения напряжений в нагрузке от частоты; на рис. 8 – пиковые значения ЭПР метки на высоте 25 мм от ее центра.

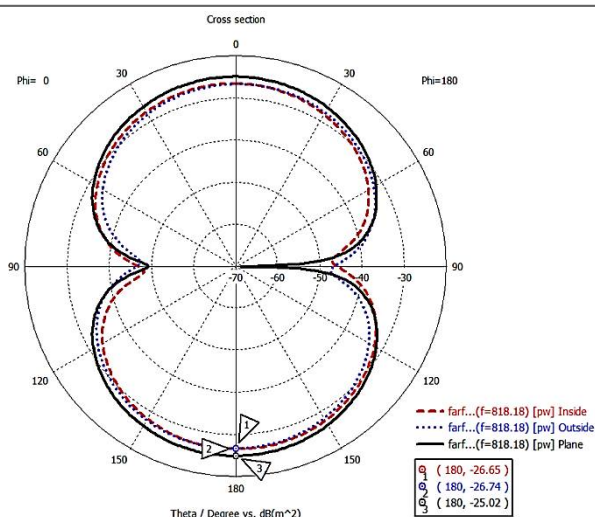


Рис. 5. Диаграммы обратного рассеяния RFID метки

По полученным картинам видно, что произошло снижение эффективной поверхности рассеяния метки, в табл. 1 приводятся сравнительные характеристики ДОР для всех трех случаев.

Таблица 1

Сравнение характеристик диаграмм обратного рассеяния

Характеристика	Плоская метка	Изгиб внутрь	Изгиб наружу
ЭПР макс, м ²	0,00315	0,00217	0,00212
Ширина главного лепестка (3 дБ), °	87	87,8	87,9

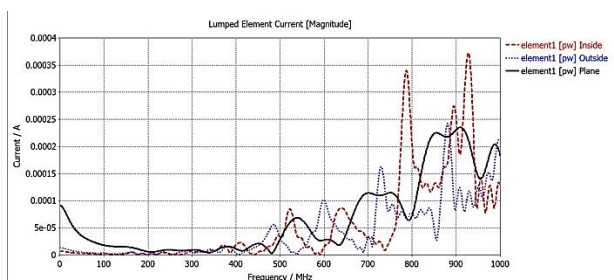


Рис. 6. Амплитуды токов в нагрузке

Как видно из полученных графиков при сохранении стандартной формы метки (без изгиба) амплитуда тока превышает 0,2 мА в диапазоне частот от 834 до 932 МГц; если же рассматривать ситуацию с изгибом внутрь превышение уровня в 0,2 мА наблюдается в трех диапазонах (774-800 МГц, 885-905 МГц, 912-940 МГц), при изгибе наружу данная ситуация наблюдается только в частотном диапазоне: 873-888 МГц. Итоговые результаты при сравнении значений токов приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение характеристик токов в нагрузке

Характеристика	Плоская метка	Изгиб внутрь	Изгиб наружу
Ток I_{max} , мА	0,235	0,372	0,242
Частота I_{max} , МГц	910,09	928,07	881,12
Диапазоны превышения 0,2 мА, МГц	834-932	774-800 885-905 912-940	873-888

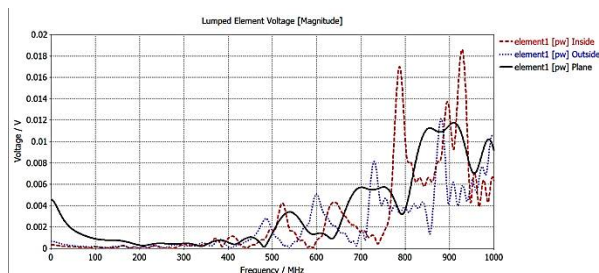


Рис. 7. Амплитуды напряжений в нагрузке

В данном случае в качестве порогового значения срабатывания выбрано напряжение в 0,01 В. Подробные характеристики приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение характеристик напряжений в нагрузке

Характеристика	Плоская метка	Изгиб внутрь	Изгиб наружу
Напряжение U_{max} , В	0,0117	0,0186	0,0121
Частота U_{max} , МГц	910,09	928,07	881,12
Диапазоны превышения 0,01 В, МГц	834-932	774-800 885-905 912-940	873-888

Как видно из полученных результатов частоты пиковых значений токов и напряжений совпадают, что вызвано идеальной нагрузкой, которая представляет из себя только 50 Ом без паразитных индуктивности и емкости.

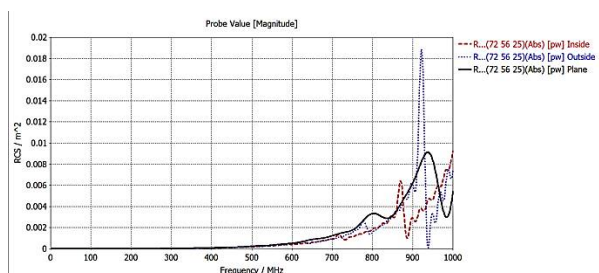


Рис. 8. Значения ЭПР метки на расстоянии 25 мм от центра

При исследовании характеристик эффективной поверхности рассеяния особый интерес вызывает максимальное значение и частота его наблюдения. В ситуации с плоской меткой без изгиба максимальное значение составило $0,0091 \text{ м}^2$ на частоте $938,06 \text{ МГц}$; при изгибе внутрь уровень ЭПР после $887,76 \text{ МГц}$ начал резко увеличиваться и достиг пикового значения на максимальной частоте исследуемого диапазона – 1000 МГц и составил $0,0092 \text{ м}^2$; если же изгиб метки был наружу, то пиковое значение ЭПР составило $0,0189 \text{ м}^2$ при частоте $922,08 \text{ МГц}$.

Заключение

В процессе исследования было обнаружено, что характеристики гибкой пассивной RFID метки сильно зависят от направления изгиба, так при изгибе происходит сужение диапазонов наблюдения пиковых значений токов и напряжений в нагрузке, изменение пиковых значений эффективной площади рассеяния.

Такие искажения способны привести к сбоям в работе RFID системы, так для предложенных ситуаций наиболее оптимальной частотой облучения для индуцирования максимальных токов является частота $838,74 \text{ МГц}$, тогда во всех рассмотренных трех случаях ток превышает $0,2 \text{ мА}$. В качестве частоты обнару-

жения метки по ЭПР рекомендуется частота $931,62 \text{ МГц}$, что обеспечит высокий уровень во всех трех рассмотренных случаях.

Литература

1. Пирогов А.А., Буслаев А.Б., Костюков А.С. Разработка моделей и алгоритмов проектирования цифровых устройств с использованием программируемых логических интегральных схем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 88-95.
2. Пирогов А.А. Методы повышения помехозащищенности и эффективности кодирования сетей связи абонентского доступа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 162-163.
3. Методика проектирования синтезатора частот прямого цифрового синтеза на базе ПЛИС / А.А. Пирогов, Е.А. Бочаров, Э.В. Сёмка, О.Ю. Макаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 108-116.
4. Сравнение статистических методов испытаний надёжности РЭС / А.С. Костюков, И.С. Бобылкин, Л.Н. Никитин, А.А. Пирогов // Надёжность и качество: тр. междунар. симпозиума, 2018. Т. 2. С. 35-37.
5. Galler F., Neunteufel D., Arthaber H. Complex-valued delta RCS simulation of RFID tags of time of flight ranging performance assessment // 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). 2019. Pp. 285-290.
6. Thomaskutty M., Ziai M.A., Batchelor J. RCS and Read Range of a UHF RFID Tag // 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2010. Pp. 460-462.

Поступила 22.10.2020; принята к публикации 21.12.2020

Информация об авторах

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Ищенко Евгений Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Папина Елизавета Владимировна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

Бердников Кирилл Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru

Савкина Юлия Дмитриевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: savcki@mail.ru

STUDY OF THE INFLUENCE OF RFID TAG BENDING ON BASIC CHARACTERISTICS

S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, E.V. Papina, K.A. Berdnikov, Yu.D. Savkina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses a passive RFID tag that sits on a flexible substrate, which leads to a problem with changing characteristics when the tag is bent. In the course of the study, we carried out modeling for three situations: a flat tag, curved inward and outward. Thanks to modern methods of electrodynamic modeling, it is possible to determine all the main characteristics of an RFID tag - in the active mode: return loss, radiation pattern; in passive mode: diagram of backscatter, currents and voltages in the load. During the simulation, we plotted graphs of the dependence of the amplitudes of currents and

voltages in the load on frequency, peak values of the effective scattering area. Thanks to the data obtained, it is possible to determine the most optimal frequencies for irradiation of an RFID tag in order to ensure its operation in an active mode (high currents and voltages in the load), as well as in the detection mode - large ESR values. The article provides graphs and tables for comparing the cases under study, which show changes in characteristics when the tag is bent, which makes it impossible to use the system in wide frequency ranges, since its possible bends should be taken into account

Key words: RFID tag, backscatter plot, radar cross section

References

1. Pirogov A.A., Buslaev A.B., Kostyukov A.S. "Development of models and design algorithms for digital devices with the use of programmable logical integral schemes", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 4. pp 88-95.
2. Pirogov A.A. "Methods of increase of noise immunity and efficiency of coding of communication networks user's access", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 1. pp 162-163.
3. Pirogov A.A., Bocharov E.A., Syemka E.V., Makarov O.Yu. "Method of designing the frequency synthesizer of direct digital synthesis on FPGA", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 6. pp 108-116.
4. Kostyukov A.S., Bobylkin I.S., Nikitin L.N., Pirogov A.A. "Comparison of statistical methods for testing the reliability of radio electronic devices", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr.mezhdunar. simpoziuma)*, 2018, vol. 2. pp. 35-37.
5. Galler F., Neunteufel D., Arthaber H. "Complex-valued delta RCS simulation of RFID tags of time of flight ranging performance assessment", *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*, 2019, pp. 285-290.
6. Thomaskutty M., Ziai M.A., Batchelor J. "RCS and read range of a UHF RFID tag", *2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2010, pp. 460-462.

Submitted 22.10.2020; revised 21.12.2020

Information about the authors

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Evgeniy A. Ishchenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Elizaveta V. Papina, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

Kirill A. Berdnikov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru

Yuliya D. Savkina, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: savcki@mail.ru

**РАЗРАБОТКА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ
ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ****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: цифровая фильтрация распознаваемых сигналов является неременной процедурой при обнаружении и распознавании сообщений. Под фильтрацией понимают любое преобразование сигналов, при котором во входной последовательности обрабатываемых данных целенаправленно изменяются определенные соотношения между различными параметрами сигналов. Системы, избирательно меняющие форму сигналов, устраняющие или уменьшающие помехи, извлекающие из сигналов определенную информацию и т.п., называют фильтрами. Соответственно, фильтры с любым целевым назначением являются частным случаем систем преобразования сигналов. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) представляют собой конфигурируемые интегральные схемы, логика работы которых определяется посредством их программирования. Применение ПЛИС для задач цифровой обработки сигналов позволяет получать устройства, способные менять конфигурацию, подстраиваться под определенную задачу за счет их гибко изменяемой, программируемой структуры. При разработке сложных устройств могут применяться в качестве компонентов для проектирования готовые блоки – IP-ядра или сложно-функциональные блоки (СФ-блоки). Использование программных СФ-блоков позволяет наиболее эффективно задействовать их в конечной структуре, в значительной степени сократить затраты на проектирование. Цель работы состоит в построении RTL модели СФ-блока цифровой обработки сигналов, его верификации как на логическом уровне, так и физическом

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, программируемая логика, временная диаграмма

Введение

В общем случае под термином цифровой фильтр называют аппаратную или программную реализацию математического алгоритма, преобразующего определенным образом цифровой сигнал. Классификация цифровых фильтров обычно базируется на функциональных признаках алгоритмов цифровой фильтрации. Цифровые фильтры могут иметь параметры, реализация которых невозможна в аналоговых фильтрах, не требуют периодического контроля и калибровки и один фильтр может обрабатывать несколько входных каналов или сигналов при этом точность ограничена только используемой разрядностью отсчетов. При этом реализация блоков цифровой обработки сигналов на ПЛИС значительно упростит аппаратные затраты и дает возможность максимально эффективно использовать указанные особенности цифровых фильтров.

Цель работы заключается в построении RTL модели СФ-блока цифровой обработки сигналов и его верификации, которая включает в себя ряд задач, связанных с различными под-

ходами и методами проектирования цифровых устройств. В данной работе изучены инструменты построения схем функциональных узлов с использованием встроенного схемного редактора и стандартных библиотечных элементов, а также ряд модулей проекта были получены на основе прямого программирования и являются уникальными [1].

Разрабатываемая модель СФ-блока цифровой обработки сигналов обеспечивает:

1. Трансфертную и рекурсивную модификацию сигнала.
2. Микширование выходных отчётов профилей фильтрации.
3. Децимацию и интерполяцию входных и выходных отчётов.
4. Работу с внешними модулями I²S, АЦП и ЦАП.
5. Получение команд управления с использованием интерфейса SPI.
6. Управление профилями фильтрации посредством линк-порта.

Общая структура СФ-блока цифровой обработки сигналов

Разработанный СФ-блок представляет собой структуру, состоящую из следующих модулей (рис. 1):

1. Ядро фильтра, позволяющее проводить N-канальную итеративную обработку данных.

2. Буфер-синхронизатор предназначен для синхронизации отдельных модулей управления транзакциями данных. Содержит буферы FIFO входных и выходных каналов, блоки управления буферами FIFO и блочной памятью. Каждый буфер имеет два канала, которые

могут работать как в параллельном, так и в последовательном режиме.

3. Линк-порт служит для быстрого управления режимами обработки сигнала путём передачи по 4-битному параллельному интерфейсу номера профиля для левого и правого канала.

4. Модуль SPI позволяет осуществлять внешнее управление СФ-блоком, предназначен для чтения и записи регистров конфигурации модулей устройства, а также для доступа к памяти программы.

Модуль I²S (аудиокодек) предназначен для управления передачи аудиоданных в системе.

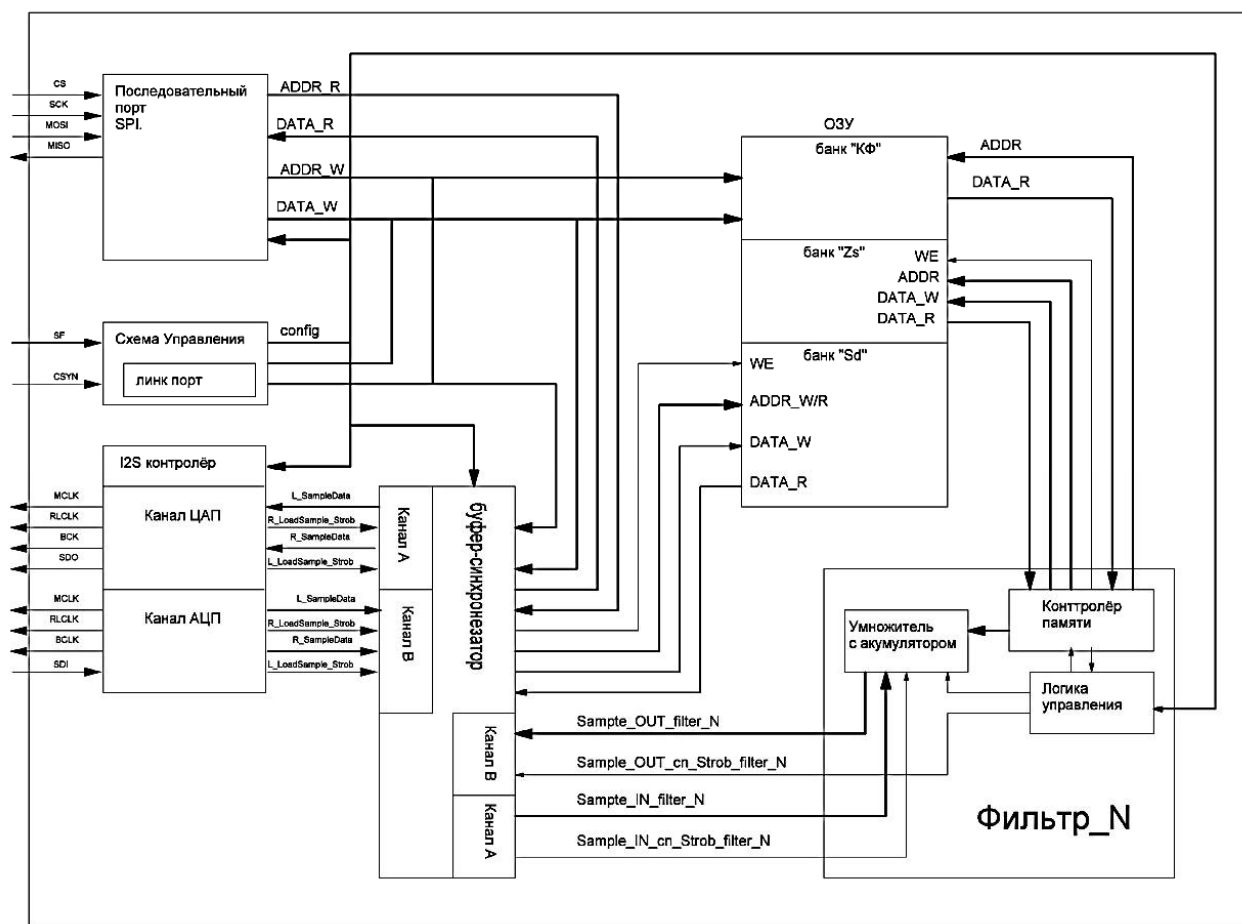


Рис. 1. Общая структура сложно-функционального блока (СФ-блока) цифровой обработки сигналов

Модуль ядра фильтра

Модуль ядра фильтра предназначен для выполнения операций итеративной обработки сигнала с входа аудиокодека, буфера или предыдущего результата работы канала, выдачи результата работы в аудиокодек, в накопитель канала, в межканальный накопитель (при

совместной работе нескольких каналов) и буфер. Модуль включает в свою структуру умножитель с накопителем, блок управления, контроллер памяти. Схема модуля фильтра и временная диаграмма работы представлена ниже на рис. 2 и рис. 3.

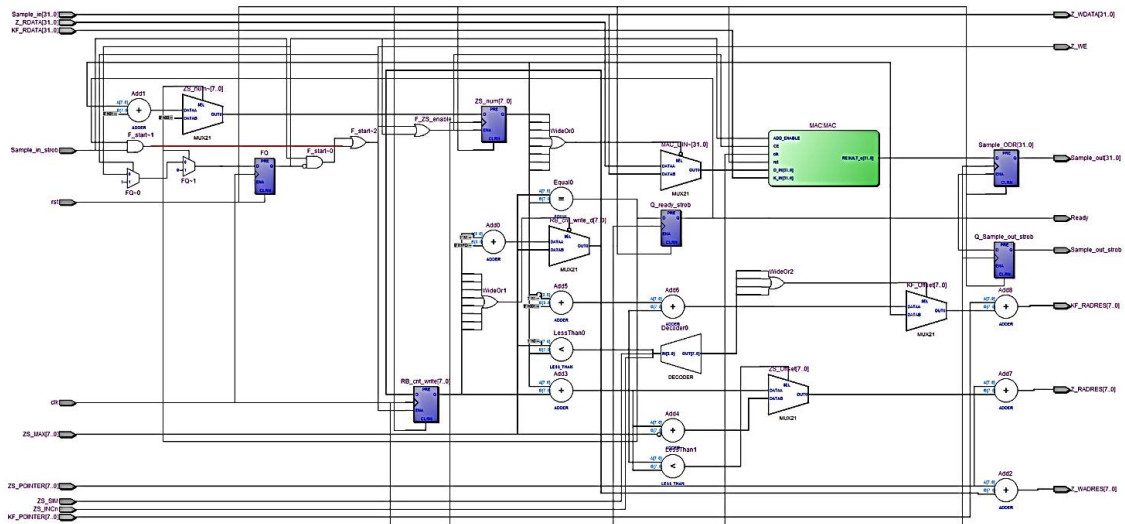


Рис. 2. Схема ядра фильтра

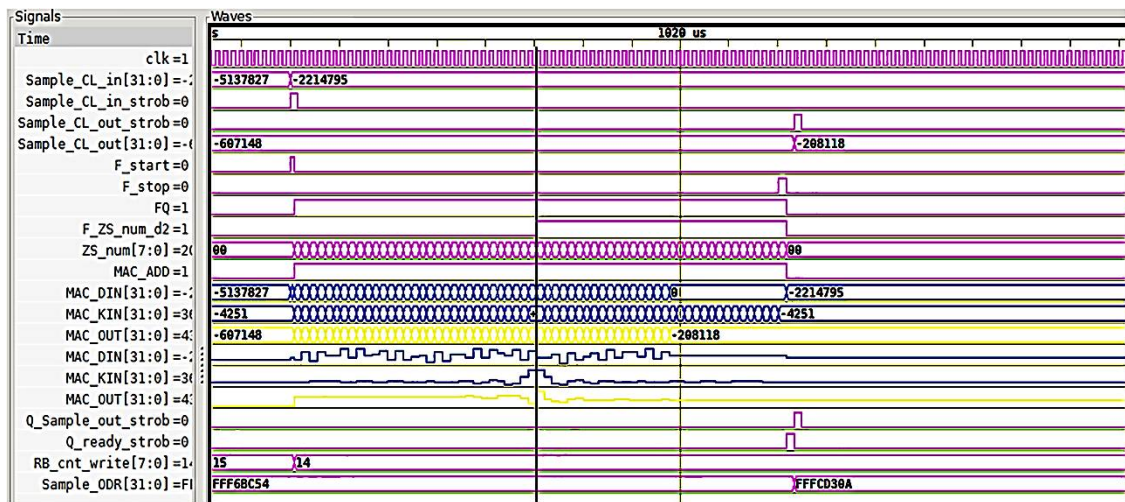


Рис. 3. Временная диаграмма работы фильтра

Параметры модуля: sample_widch = 32-разрядность входных отчётов сигнала; kf_widch = 32-разрядность коэффициентов; kf_dot_pos = 24-разрядность дробной части коэффициентов; adres_kf_widch = 8-разрядность адреса памяти коэффициентов; adres_zs_widch = 8-разрядность адреса памяти промежуточных отчётов.

Интерфейс модуля:

Clk – вход системной частоты.

Rst - асинхронный сброс модуля.

Input wire kf_pointer – указатель на начало массива коэффициентов текущего профиля фильтрации.

Input wire zs_pointer – указатель на начало буфера промежуточных результатов текущего профиля фильтрации.

Input wire zs_max – количество коэффициентов в текущем профиле.

Input wire zs_sim - призрак симметричности коэффициентов.

Input wire ZS_incn – инкремент/декремент чтения.

Input wire signed sample_in – входные данные.

Input wire sample_in_strob – строб входных данных.

Output wire signed sample_out – выходные данные.

Output wire sample_out_strob – строб выходных данных, единичный импульс на частоте Clk.

Output wire z_wadres – адрес чтения буфера промежуточных отчётов.

Output wire z_we – строб записи в z-буфер.

Output wire z_wdata – выход данных для записи в z-буфер.

Output wire z_radres – выход данных на запись в z-буфер.

Input wire z_rdata – вход данных из z-буфера.

output wire kf_radres – адрес чтения памяти коэффициентов.

input wire kf_rdata – выход памяти коэффициентов.

output wire ready – строб готовности фильтра принять новые данные.

Блок управления предназначен для контроля фильтрационными каскадами с помощью N-канального стекового автомата, использующего распределенную память программ. Позволяет управлять кольцевым буфером, выдает сигналы адреса чтения данных и записи текущего отчета в линию сдвига.

Модуль умножителя обеспечивает умножение входных данных в формате с фиксированной точкой и прибавление предыдущего

результата операции. Схема представлена ниже (рис. 4).

Параметры модуля: parameter di_width = 24-разрядность порта входных данных; parameter kf_width = 32-разрядность порта входных коэффициентов; parameter kf_dot_pos = 24-разрядность дробной части

Интерфейс модуля:

Input clk – тактирование модуля.

Input rst – асинхронный сброс триггеров.

Input ce – разрешение работы триггеров.

Input add_enable – разрешение накопления.

Input wire signed d_in – вход данных.

Input wire signed k_in – вход коэффициентов.

Output wire signed result_o – результат.

Output wire result_val_o – сигнал валидности выходных данных.

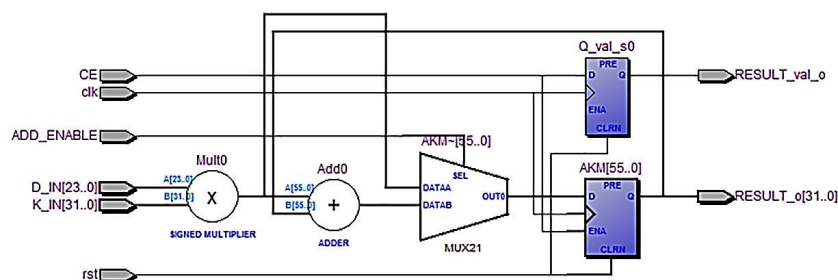


Рис. 4. Общая структурная схема умножителя

Контроллер памяти предназначен для организации доступа к оперативной памяти (ОЗУ) системы, буферу-синхронизатору и модулю внешнего управления в режиме сквозной адресации, блокам фильтрации в режиме страничной адресации [2].

ОЗУ включает банк коэффициентов фильтра (Bank «Cf»), банк входных, выходных и промежуточных отчётов работы блока фильтра (Bank «Zs»), банк начальных и конечных результатов работы фильтра (Bank «Sd»).

Модуль I²S

Шина I²S передает по разным линиям сигналы синхронизации и сигналы данных. Интерфейс I²S соответствуют следующие сигналы:

1. Тактовый сигнал битовой синхронизации.
2. Тактовый сигнал фреймовой синхронизации.

3. Сигнал данных, который может передавать или принимать 2 разделённых по времени канала [3].

Каналы для приёма и передачи данных разделены. Контроллер принимает данные, передаваемые звуковым кодеком, и передает после обработки. Схема контроллера I²S и его временная диаграмма представлены на рис. 5 и рис. 6.

Параметры модуля: parameter mclk_fs - количество тактов mclk за период rclk; parameter datasize - разрядность параллельных портов; parameter framesize - количество тактов bclk в полупериод rclk; parameter clkdiv - делитель mclk.

Интерфейс модуля:

Input clk_i - вход тактирование модуля.

Input rst - вход асинхронного сброса.

Input wire datain_l - вход данных ЦАП левый канал.

Input wire datain_r - вход данных ЦАП правый канал.

Output reg dataout_l - выход данных АЦП левый канал.

Output reg dataout_r - выход данных АЦП правый канал.

Output wire dataout_l_strob - строб выдачи данных АЦП левый.

Output wire dataout_r_strob - строб выдачи данных АЦП правый канал.

Output wire i2s_dac_mclk_o - сигнал тактирования ЦАП.

Output wire i2s_dac_bclk_o - сигнал битовой синхронизации ЦАП.

Output wire i2s_dac_sdout_o - последовательный вход ЦАП.

Output wire i2s_dac_rclk_o - сигнал канальной синхронизации ЦАП.

Output wire i2s_adc_mclk_o - выход тактирования АЦП.

Inout wire i2s_adc_bclk_o - битовая синхронизация АЦП.

Input wire i2s_adc_sdin_o - последовательный выход АЦП.

Inout wire i2s_adc_rclk_o - канальная синхронизация АЦП.

Output dac_strob_cr - строб загрузки новых данных для передачи ЦАП правый канал.

Output dac_strob_cl - строб загрузки левого канала ЦАП.

I2S_master_configreg - регистр конфигурации модуля I²S_master.

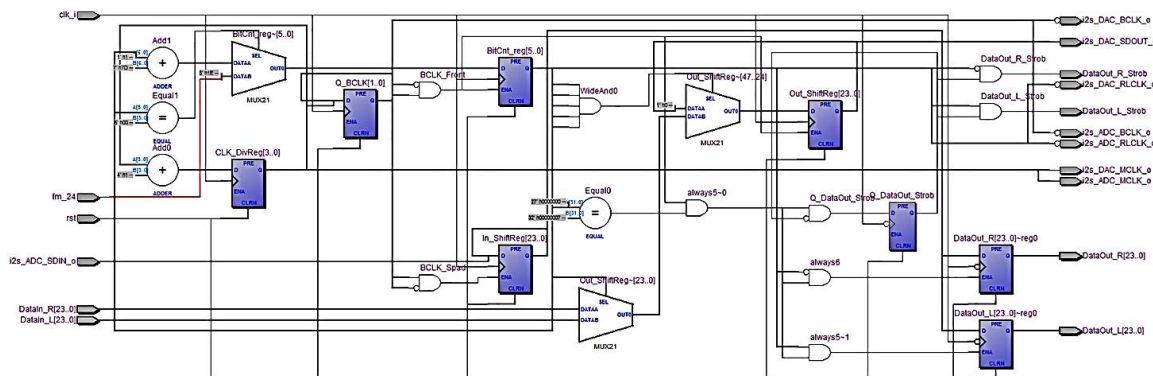


Рис. 5. Общая структурная схема контроллера I²S

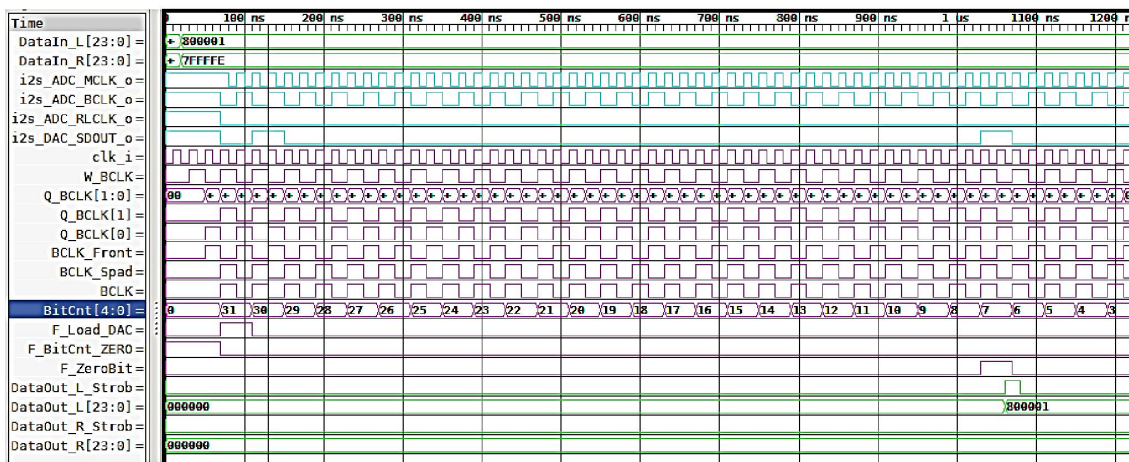


Рис. 6. Временная диаграмма работы контроллера I²S

Модуль SPI

Модуль обеспечивает доступ устройства управления к внутренней памяти и регистрам управления по средствам передачи байта управления. Схема модуля представлена на рис. 7, временные диаграммы на рис. 8 и рис. 9.

Параметры модуля: data_width = 32; - разрядность шины данных; addr_width = 16; -

разрядность шины адреса; cpha(master) = 0 – фаза синхронизации, установка данных по спаду; firstbit = 1 – порядок следования, первый старший бит; byteorder = 0 – порядок следования, первый младший бит; miso_pol = уровень выхода последовательного порта при ожидании.

Интерфейс модуля:

Clk_i - вход тактирования модуля.

Rst - асинхронный сброс.
 Addr_r - выход адреса слова чтения.
 Addr_w - выход адреса кодового слова за-
 писи.
 D_in - вход шины данных.
 Dqo - выход шины данных
 We_o - строб записи в память.

Spi_cs - разрешение работы последова-
 тельного порта.
 Spi_sck - тактовый сигнал последователь-
 ного порта.
 Spi_mosi - вход данных последовательно-
 го порта.
 Spi_miso - выход данных последователь-
 ного порта.

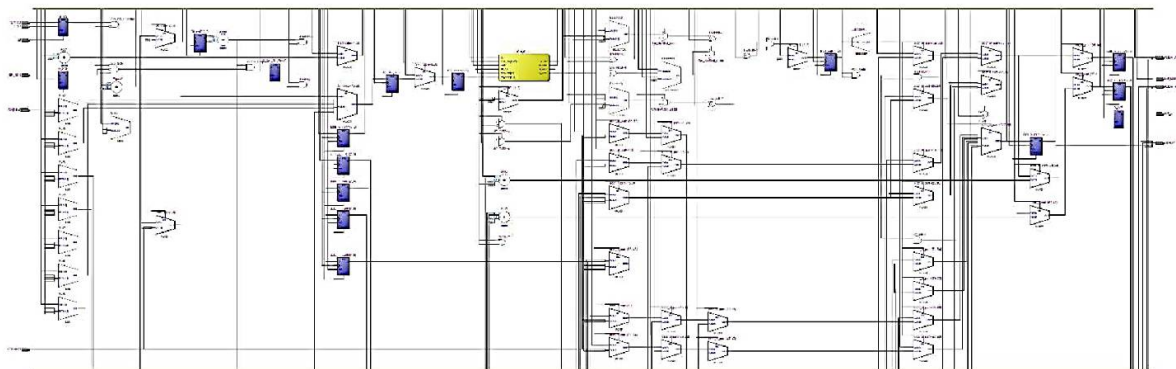


Рис. 7. Структурная схема контроллера SPI

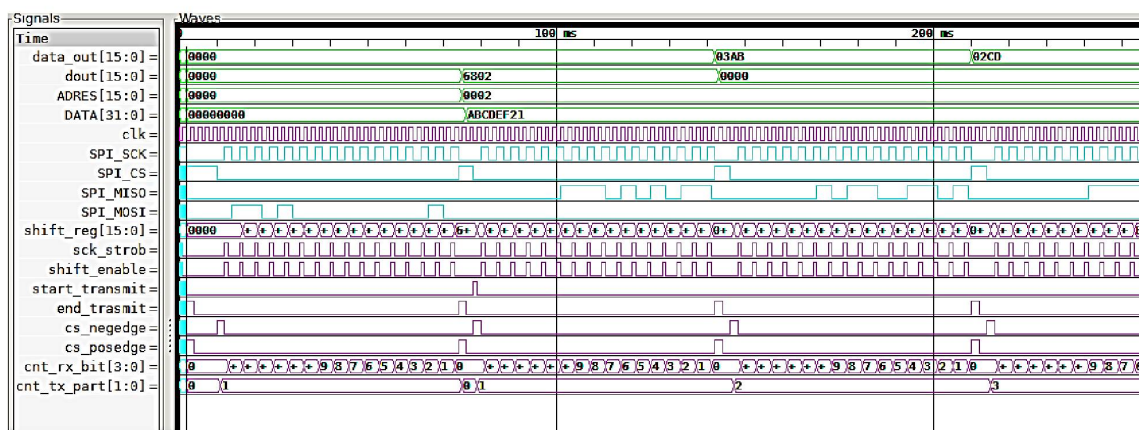


Рис. 8. Временная диаграмма работы модуля в режиме «C-D8»

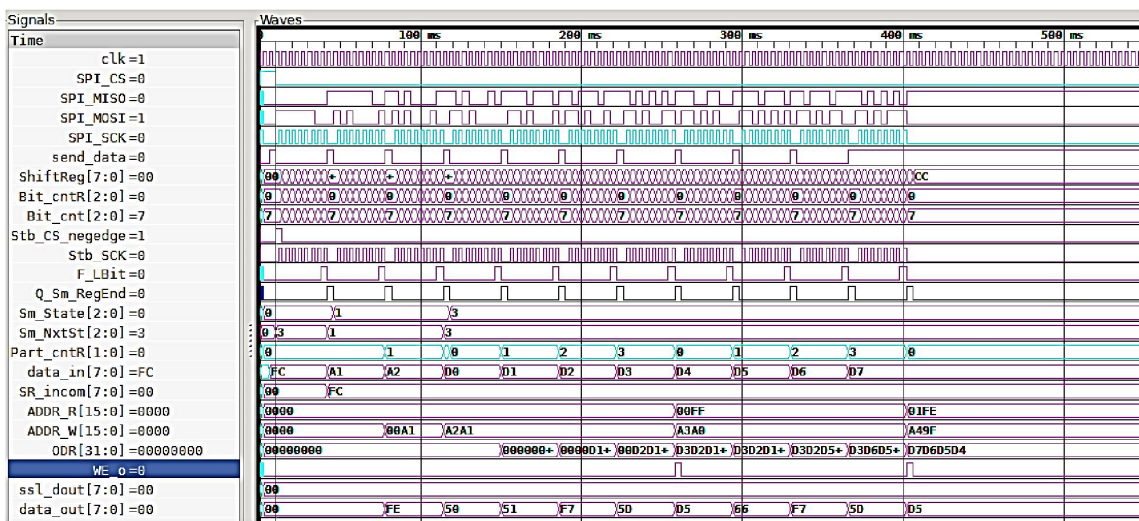


Рис. 9. Временная диаграмма работы модуля в режиме «serial»

Считывание данные с линии MISO происходит по фронту SCK, установка данных на выходе MISO - по спаду [4]. Входные и выходные данные передаются старшим битом вперёд, данные в режиме «serial» младшим байтом вперёд. Также выдачу сигнала прерывания определяем путём инверсии уровня MISO_POL.

Разработанная модель СФ-блока цифровой обработки сигналов была реализована и прошла физическую верификацию на базе отладочной платы Basys 2 на основе ПЛИС Xilinx Spartan 3E (рис. 10). В тестовом стенде были также использованы внешние модули АЦП и ЦАП. В качестве устройства управления использован микроконтроллер, который в момент включения устройства производит загрузку программы и таблицы коэффициентов фильтров. Реконфигурируемое устройство было проверено в режимах работы фильтра нижних и высоких частот, полосового фильтра. Работа тестовой системы подтвердила результаты проведенного моделирования из чего можно сделать вывод, что полученная модель является законченной и работоспособной.

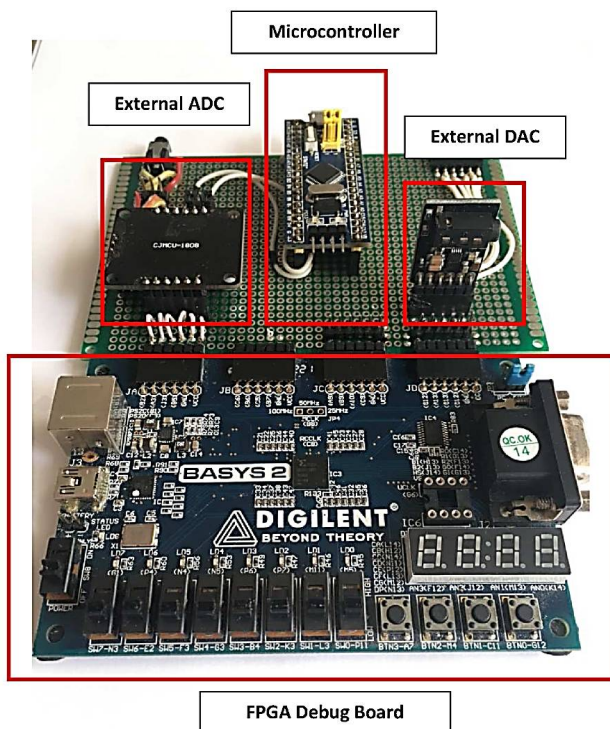


Рис. 10. Тестовый стенд на базе отладочной платы Basys 2

Поступила 01.11.2020; принята к публикации 21.12.2020

Информация об авторах

Пирогов Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Заключение

В ходе выполнения данной работы было спроектировано реконфигурируемое цифровое устройство на базе ПЛИС, позволяющее проводить последовательную и многоканальную обработку аудиосигналов. В качестве устройства контроля был использован микроконтроллер, управляющий СФ-блоком по интерфейсу SPI. СФ-блок имеет открытую архитектуру, что позволяет адаптировать его в системе под требуемую задачу. Полученная архитектура обладает также высокой эффективностью за счет небольшого количества задействованных вентилях ПЛИС (порядка 25% от общего доступного числа), что дает возможность наращивания структуры с добавлением дополнительных модулей - ядер фильтра.

Литература

1. Экспериментальное исследование сверхширокополосной антенны, построенной на основе модификации плоской линзы Люнеберга / С.А. Антипов, А.В. Ашихмин, В.В. Негроров, С.М. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 3. С. 113-118.
2. Башкиров А.В., Свиридова И.В., Муратов А.В. Эффективное многопороговое декодирование двоичных кодов с предварительной оценкой ошибочности проверок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 3. С. 99-101.
3. Пирогов А.А. Методы повышения помехозащищенности и эффективности кодирования сетей связи абонентского доступа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 162-163.
4. Методика проектирования синтезатора частот прямого цифрового синтеза на базе ПЛИС / А.А. Пирогов, Е.А. Бочаров, Э.В. Сёмка, О.Ю. Макаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 108-116.

Пирогова Юлия Александровна – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: gvendilon@mail.ru

Гвозденко Сергей Анатольевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: jgsar@mail.ru

Шардаков Дмитрий Вячеславович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), 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

DEVELOPMENT OF RECONFIGURABLE DEVICES BASED ON PROGRAMMABLE LOGIC INTEGRATED CIRCUITS

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

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: digital filtering of recognized signals is an indispensable procedure for the detection and recognition of messages. Filtering is understood as any transformation of signals in which certain relationships between different signal parameters are purposefully changed in the input sequence of the processed data. Systems that selectively change the shape of signals, eliminate or reduce interference, extract certain information from the signals, and so on, are called filters. Accordingly, filters with any purpose are a special case of signal conversion systems. Programmable logic integrated circuits (FPGAs) are configurable integrated circuits whose logic is defined through programming. The use of FPGAs for digital signal processing tasks makes it possible to obtain devices capable of changing the configuration, adapting to a specific task due to their flexibly changeable, programmable structure. When developing complex devices, ready-made blocks - IP-cores or complex-functional blocks (SF blocks) - can be used as components for design. The use of software SF-blocks allows them to be used most effectively in the final structure, to a significant extent to reduce design costs. The purpose of the work is to build an RTL model of the SF-block for digital signal processing, its verification both at the logical and physical levels

Key words: digital signal processing, programmable logic, timing diagram

References

1. Antipov S.A., Ashikhmin A.V., Negrobov V.V., Fyedorov S.M. “Experimental study of an ultra-wideband antenna based on a modification of a flat Luneberg lens”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol.8, no. 3, pp. 113-118.
2. Bashkirov A.V., Sviridova I.V., Muratov A.V. “Efficient multi-threshold decoding of non-binary codes with preliminary error estimation of checks”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol.11, no. 3, pp. 99-101.
3. Pirogov A.A. “Methods for increasing noise immunity and coding efficiency of communication networks of subscriber access”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol.7, no. 1, pp. 162-163.
4. Pirogov A.A., Bocharov E.A., Syemka E.V., Makarov O.Yu. “Methodology for designing a direct digital synthesis frequency synthesizer based on FPGAs”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol.14, no. 6, pp. 108-116.

Submitted 01.11.2020; revised 21.12.2020

Information about the authors

Aleksandr A. Pirogov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pirogov.alx@gmail.com

Yuliya A. Pirogova, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: gvendilon@mail.ru

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

Dmitriy V. Shardakov, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, 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” (54 “A” Starykh Bol’shevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: borishms@mail.ru

МЕТОДИКА СБОРА И ОЦЕНКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМП НА ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА**М.А. Ромащенко¹, Д.В. Васильченко¹, А.Л. Неклюдов¹, С.Н. Рожненко², К.Ч. Колбая³**¹**Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**²**АО ВЦКБ «Полус», г. Воронеж, Россия**³**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия**

Аннотация: в настоящее время перед разработчиками радиоэлектронных устройств стоит множество проблем, которые необходимо учитывать в процессе проектирования радиоэлектронных средств (РЭС). Одной из таких проблем является обеспечение бесперебойной работы устройства в неблагоприятной для него радиоэлектронной обстановке и прохождение обязательной сертификации изделия по стандартам помехозащищенности. Ярким примером неблагоприятной радиоэлектронной обстановки являются современные города, где присутствует множество промышленных помех, обусловленных активным использованием и высокой концентрацией высокочастотных средств связи, радиостанций, сетевых технологий, компьютерной аппаратуры и бытовых приборов. Такая большая концентрация радиоэлектронного оборудования при работе вызывает множество внешних электромагнитных полей, которые негативно сказываются на работоспособности других электронных устройств, вызывая их сбои и нарушение работоспособности в целом. Статья рассматривает основные принципы методики анализа данных при тестировании электронных средств на воздействие электромагнитного излучения. Проблема, на решение которой направлена данная методика — выявление степени устойчивости электронных средств к воздействию электромагнитного излучения на этапе их проектирования. Методика описывает сбор данных из аппаратной части комплекса тестирования электронных средств на воздействие электромагнитных помех, а также дальнейшую их обработку на основании базы эвристических решений

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, поляризация электромагнитных волн, электромагнитные помехи, проектирование электронных средств, сертификация, испытания, тестирование, повышение качества

Введение

В процессе проектирования электронного средства конструктор сталкивается с рядом проблем, связанных не только с обеспечением бесперебойной работы устройства, но и его последующей сертификации перед выводом на рынок. Так, ГОСТ Р 50397-2011 определяет электромагнитную совместимость (ЭМС) технических средств как их способность функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке, при этом не создавая недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам. При этом под техническим средством данный ГОСТ подразумевает любое электротехническое, электронное или радиоэлектронное изделие, а также любое изделие, содержащее электрические и/или электронные составные части. Таким образом, все вышеуказанные технические средства должны разрабатываться с учетом соответствующих требований в части обеспечения электромагнитной совместимости и устойчивости к воздействиям электромагнитных помех, а также проходить обязательную сертификацию по этому параметру.

Работа программно-аппаратного комплекса

Испытуемое изделие помещается в рабочий объем аппаратного комплекса непосредственно в области воздействия излучателя, фиксируясь в специализированном зажиме. В зависимости от вида воздействия выбирается подходящая излучающая антенна, устанавливаемая в центральной части камеры на устройство позиционирования.

Комплекс в себя следующие подсистемы:

- тестирующая установка;
- ПК со специализированным программным обеспечением;
- стандартный генератор электромагнитного излучения сигналов;
- блок формирования тестирующих сигналов;
- блок оценки выходных параметров.

Взаимодействие программного обеспечения с аппаратной частью комплекса

В программном обеспечении реализованы следующие функции:

1. Работа с позиционирующей системой;
2. Работа с базами данных для записи,

хранения и обработки результатов;

3. Управление модулятором сигналов;

4. Задача входных сигналов для тестируемого устройства;

5. Считывание значений с выходов тестируемого устройства;

6. Экспертная система анализа и оценки устойчивости электронного средства к воздействию электромагнитных помех;

7. Выгрузка данных в сторонние САПР.

Функция работы с контроллером позиционирования основана на формировании G-кода перед началом тестирования каждого отдельно взятого устройства и его последовательного воспроизведения. Базы данных используются для упрощенного взаимодействия и хранения данных о проведенных тестированиях, устройствах, которые были протестированы с сохранением их характеристик и параметров сигналов вход/выход, а также режимах тестирования.

В формирователь сигнала заносится информация о частотах и уровнях излучения. Управление модулятором радиоизлучения производится путём записи по интерфейсу RS-232 необходимых параметров. Блок формирования сигналов осуществляет обработку сигналов, поступающих от тестируемого устройства, и передаёт их в ПК оператора. Запись измеряемых параметров производится в базу данных для последующей обработки.

Методика сбора и анализа результатов испытаний

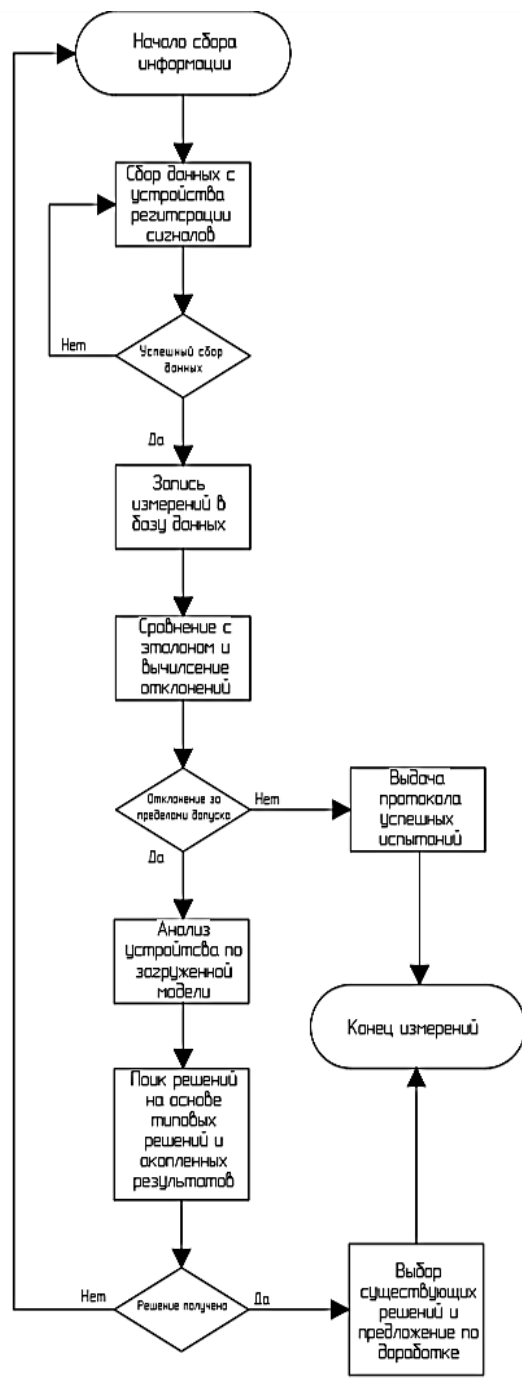
Анализ результатов основан на аналитическом алгоритме, который сравнивает поступающие от блока приема входных параметров значения и делает выводы о возможности или невозможности коррекции устройства для улучшения его параметров. В ПО занесена информация о некоторых экранирующих материалах и их свойствах для возможности рекомендации пользователю о применении материалов в качестве защитного экрана. Алгоритм работы программного обеспечения представлен на блок-схеме рис. 1. После подачи команды оператором к сбору данных установка, в случае успешного отклика блока сбора данных, производит запись поступающей информации в базу данных. Из базы данных она поступает в вычислительный блок, где происходит сравнение полученных данных сигналов с их эталонными значениями, промоделированными на этапе проектирования. В случае, если полученные данные имеют минимальные допустимые отклонения, устройство признается прошедшим

испытания и получает протокол об успешном прохождении тестирования с описанием основных контрольных точек и выводом среднего отклонения в них. В случае, если отклонения являются существенными и в последующем могут привести к некорректной работе устройства, программный комплекс производит анализ типовых решений, а также решений на основании ранее проведенных тестов. Поиск решений заключается в анализе топологии тестируемого устройства и выявлении наиболее слабых компонентов и схмотехнических решений в каждой отдельно взятой точке испытаний (по частоте воздействующего излучения и его интенсивности). Проведя выборку из наиболее уязвимых элементов, а также участков рисунка печатной платы, программный комплекс производит поиск типовых решений и предлагает несколько вариантов оператору установки. Данные варианты включают в себя список изменений, которые могут помочь улучшить характеристики устройства. К таким относится предложения по экранированию, замене элементной базы, а также пересмотр печатного рисунка устройства. В случае, если такой поиск не даёт результатов, установка выдаёт сообщение об ошибке и предлагает повторить тестирование либо же прекратить работу установки.

Для более детального анализа печатной платы в базу данных программного обеспечения загружается детальная модель устройства с полной информацией о его топологии. Программа осуществляет поиск информации о характеристиках каждого из элементов устройства. Информация об элементах загружается путём добавления официальных технических спецификаций элемента. Принятие того или иного решения относительно экранирования устройства основывается на информации об экранирующих свойствах различных материалов с учётом планируемого места эксплуатации разрабатываемого устройства. Предложения по внесению изменений в топологию устройства основаны на накопленном программным обеспечением «опыте» от предыдущих тестов, а также базе данных основных мест возникновения излишней напряженности с учётом частоты, на которых работает само устройство, а также его отдельно взятые элементы.

Печатный рисунок платы подвергается анализу путём проверки ширины печатного рисунка с учётом проходящих сигналов, а также мест, способных создавать резонанс на определенных частотах. В итоге комплексного анализа программная часть комплекса способна определить слабые места в топологии разрабатываемого устройства и предложить пути их решения.

Заключительным этапом обработки полученных данных является подборка оптимальных решений для устранения выявленных электромагнитных отклонений. Для этого создана база данных стандартных решений, которые направлены в первую очередь на экранирование электронного средства от внешних электромагнитных воздействий. Для этого в базу данных занесена информация о различных экранирующих материалах, применяемых для защиты электронных средств от воздействия электромагнитных помех.



Блок-схема работы программной части комплекса

Заключение

В процессе проектирования электронных средств разработчик сталкивается с рядом проблем, связанных с обеспечением электромагнитной совместимости, решение которых на этапе проектирования позволит значительно снизить временные и материальные затраты на производство устройства. В связи с этим применение подобных программно-аппаратных комплексов позволит предприятиям за более короткие сроки выпускать максимально продуманное устройство, которое без проблем пройдет международную сертификацию на ЭМС и выйдет на рынок без дополнительных затрат на доработку. Созданная Методика сбора и анализа результатов испытаний упрощает разработку устройства, поскольку позволяет на основе полученных экспериментальных данных выявить слабые стороны испытуемого устройства и выдать рекомендации по их доработке.

Литература

1. Ромащенко М.А., Неклюдов А.Л., Васильченко Д.В. Методика построения градиентных карт ближнего электромагнитного поля двухсторонних и многослойных печатных плат // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4. С. 74-78.
2. Ромащенко М.А. Методика анализа помехоустойчивости печатных плат при проектировании РЭС с учетом ЭМС // Радиотехника. 2014. № 3. С. 92-95.
3. Ромащенко М.А. Конструкторско-технологические аспекты обеспечения ЭМС при разработке РЭС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 149-151.
4. Ромащенко М.А. Измерение эмиссии излучаемых помех РЭС в задачах обеспечения ЭМС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 7. С. 20-22.
5. Ромащенко М.А. Планирование и проведение работ по обеспечению электромагнитной совместимости при разработке электронных средств // Надежность и качество: труды международного симпозиума. 2011. Т. 2. С. 57-58.

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kivr@vorstu.ru

Васильченко Дмитрий Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Shadow951@bk.ru

Неклюдов Андрей Львович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: an.necludov@yandex.ru

Рожненко Сергей Николаевич – технический директор, АО ВЦКБ «Полус» (394019, Россия, г. Воронеж, ул. Краснодонская, 16Б), e-mail: kivr@vorstu.ru

Колбая Камила Чичиковна – канд. техн. наук, доцент, 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: kolbaya-kamila@rambler.ru

METHODS FOR COLLECTING AND EVALUATION OF DIAGNOSTIC SIGNALS IN ANALYSIS OF EMF IMPACT ON ELECTRONIC DEVICES

M.A. Romashchenko¹, D.V. Vasilchenko¹, A.L. Neklyudov¹, S.N. Rozhnenko², K.Ch. Kolbaia³

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²JSC VCCB "Polyus", Voronezh, Russia

³Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E.Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy", Voronezh, Russia

Abstract: currently, the developers of radio electronic devices face many problems that must be taken into account in the process of designing radio electronic devices (RED). One of these problems is to ensure the uninterrupted operation of the device in an unfavorable radio-electronic environment and the passage of the mandatory certification of the product according to noise immunity standards. A striking example of an unfavorable radio-electronic environment are modern cities, where there is a lot of industrial interference caused by the active use and high concentration of high-frequency communications, radio stations, network technologies, computer equipment and household appliances. Such a large concentration of radio electronic equipment during operation causes many external electromagnetic fields, which negatively affect the performance of other electronic devices, causing them to malfunction and malfunction in general. This article examines the basic principles of data analysis methodology when testing electronic devices for exposure to electromagnetic radiation. The problem to be solved by this technique is to identify the degree of resistance of electronic devices to the effects of electromagnetic radiation at the stage of their design. The methodology describes the collection of data from the hardware of the complex for testing electronic devices for the effect of electromagnetic interference, as well as their further processing based on the base of heuristic solutions

Key words: electromagnetic compatibility, polarization of electromagnetic waves, electromagnetic interference, electronic design, certification, tests, testing, quality improvement

References

1. Romashchenko M.A., Neklyudov A.L., Vasil'chenko D.V. "Methods for constructing gradient maps of the near electromagnetic field of double-sided and multilayer printed circuit boards", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 74-78.
2. Romashchenko M.A. "Methodology for analyzing the noise immunity of printed circuit boards in the design of radio electronic devices taking into account EMC", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 3, pp. 92-95.
3. Romashchenko M.A. "Design and technological aspects of ensuring EMC in the development of RED", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 149-151.
4. Romashchenko M.A. "Measurement of the emission of radiated interference from radio equipment in the tasks of ensuring EMC", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 7, pp. 20-22.
5. Romashchenko M.A. "Planning and performance of work to ensure electromagnetic compatibility in the development of electronic devices", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: trudy mezhdunarodnogo simpoziuma)*, 2011, vol. 2, pp. 57-58.

Submitted 27.10.2020; revised 21.12.2020

Information about the authors

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

Dmitriy V. Vasil'chenko, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Shadow951@bk.ru

Andrey L. Neklyudov, Graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: an.necludov@yandex.ru

Sergey N. Rozhnenko, Technical Director of JSC VCCB "Polyus" (16B Krasnodonskaya str., Voronezh 394019, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

Kamila Ch. Kolbaya, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54 "A" Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: kolbaya-kamila@rambler.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛИНЗЫ РОТМАНА, ВЫПОЛНЕННОЙ НА ОСНОВЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ**Ю.Г. Пастернак^{1,2}, В.А. Пендюрин³, Ф.С. Сафонов²**¹ЗАО «ИРКОС», г. Москва, Россия²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия³АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия

Аннотация: печатные линзы Ротмана из-за своей достаточной простоты построения и за свои широкополосные свойства, а именно за счет коэффициента частотного перекрытия (может достигать 2-3 и даже более), являются одним из основных перспективных направлений для формирования лучей в многолучевых антенных решетках (МАР). Принцип работы таких линз основан на различных путях распространения волны внутри ее структуры, благодаря которому линза может работать в сверхширокой полосе частот. Но из-за этого возникает новая проблема, а именно: увеличение габаритных размеров антенной системы. Вследствие чего такую конструкцию очень сложно интегрировать в компактную систему приемопередатчика. Эту проблему предлагается решить путем разработки более компактной линзы Ротмана, сложенной пополам. Такой кардинальный метод изменения (уменьшения) габаритных размеров линзы Ротмана мы объясняем тем, что основным типом волны, переносящим подавляющую долю энергии, является волна ТЕМ, для которой практически отсутствует дисперсия в СВЧ-ламинатах с малыми потерями. А для радиолокации, радиопеленгации и связи нужны именно такие способы решения технических трудностей. Но перед тем как создать опытную модель или макет антенной решетки, необходимо провести ряд экспериментов, расчетов и подтвердить заданные технические характеристики ФАР. В данной работе была создана и посчитана математическая модель линзы Ротмана, основанная на том, что ее свернули пополам

Ключевые слова: математическая модель, модифицированная линза Ротмана, ТЕМ-волна

Введение

Линзы Ротмана [1], [2] в простейшем своем исполнении представляют собой квазиоптические пучкообразующие электросети, в состав которых входят две основные части: первая часть - параллельные пластины линзы, ограниченной двумя фигурными контурами (контур порта луча и порта матрицы), и вторая часть - набором фазовращателей/линий задержки. Благодаря тому, что линзы Ротмана имеют свойство широкополосности и работают в достаточно большом угловом диапазоне, они являются очень привлекательными для работы многолучевых антенных решеток. Такие требования и свойства линзы являются важнейшим, а во многих случаях и решающим критерием для многих гражданских и военных систем, таких как 5G связь, многопользовательская связь и системы наблюдения и безопасности [2]. Большинство существующих образцов, описанных в литературе, представляют собой однослойные структуры, где полный разворот линзы превышает по размерам ее излучающие части [3]-[5], что приводит к увеличению габаритных размеров всей антенной системы. Насколько нам из-

вестно, до сих пор сообщалось лишь о нескольких способах уменьшения габаритных размеров таких линз, а именно:

- 1) использование материала с отрицательным показателем преломления (внутри полости линзы) [6];
- 2) складывание линзы в середине ее полости [7];
- 3) уменьшение длины линий задержки [8];
- 4) извилистость линий задержки [9];
- 5) многослойные конфигурации [10]-[12].

В работе Tekkouki et al. [12], рассказано о попытке уменьшить размер линз Ротмана при помощи технологии интегрированного волновода подложки (SIW) [13]-[17]. Суть состояла в размещении линий задержки и полости линзы в двух слоях, соединенных переходом на основе отражателя SIW и нескольких звездообразных щелей, распределенных вдоль контура порта матрицы линзы. В работе [12] азимутальная симметрия звездообразной линзы гарантирует эффективную связь падающей волны с углом падения при условии уменьшения полосы излучения. Лепестки линзы вдоль контуров портов решетки сделаны с определенными цилиндрическими переходными отверстиями, соединенными с ребристыми волноводными линиями задержки. Такие переходы позволяют улуч-

шить полосу пропускания при большем угле обзора.

В данной работе была предпринята попытка уменьшить габаритные размеры линзы Ротмана, «свернув» её пополам. Модель линзы Ротмана показана на рис. 1.

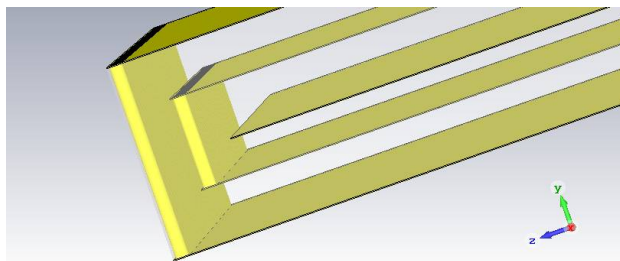


Рис. 1. Модель линзы Ротмана, сложенной пополам

Перед тем, как создать опытную модель или макет антенной решетки необходимо провести ряд экспериментов, расчетов и подтвердить заданные технические характеристики ФАР. В данной работе была создана и посчитана математическая модель линзы Ротмана, основанная на том, что ее свернули пополам. Эта модель состоит из 5 слоев металла, 3 из которых являются «землей», разделенных между собой слоями диэлектрика Rogers TMM 10i (проницаемость 9.8). Габаритные размеры печатной платы без разъемов – $500 \times 225 \times 7.41 \text{ мм}^3$.

Конструкция и внешний вид линзы Ротмана

Слои линзы Ротмана, свернутой пополам, а именно замыкание внешних земляных проводников было осуществлено при помощи переходных отверстий, показанных на рис. 2. Замыкание двух частей линзы также осуществлялось с помощью переходных отверстий.

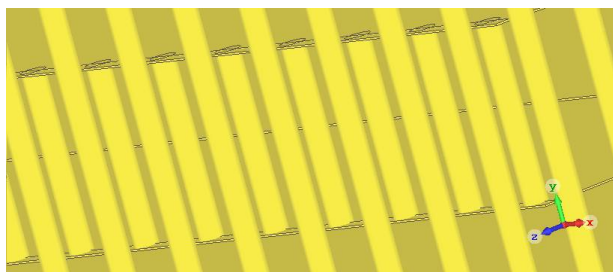


Рис. 2. Слои линзы Ротмана, свернутой пополам

Для осуществления антенно-фидерного тракта использовались порты линзы, а именно соединение линзы и элементов АР производилось при помощи коаксиальных кабелей с со-

противлением 50 Ом. Кабели были сделаны одинаковой длины. На рис. 3 показаны порты линзы, ведущие к элементам антенной решетки.

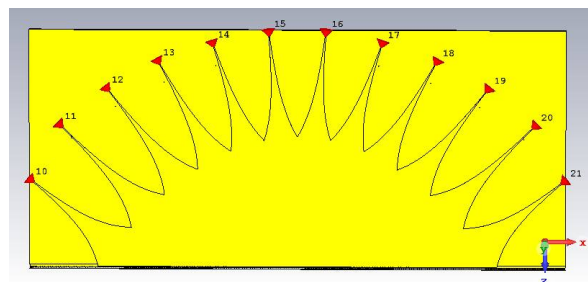


Рис. 3. Порты линзы, ведущие к элементам антенной решетки

На рис. 4 продемонстрировано, каким образом осуществляется подключение к портам и какие порты являются диаграммообразующими, а какие балластными. Входы линзы 2-6 (а также симметричные им входы 7-9 и 22-23) являются диаграммообразующими, их число 10 соответствует числу лепестков. Порты 1 и 24 являются балластными.

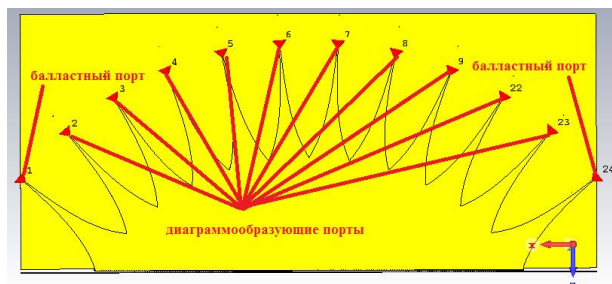


Рис. 4. Входы линзы Ротмана по их назначению

Математическая модель разворота участка линзы Ротмана на 180 градусов

Рассмотрим модель разворота на 180 градусов участка линзы Ротмана, выполненной на основе несимметричной полосковой линии (внешние проводники – тело линзы, внутренний проводник – земля).

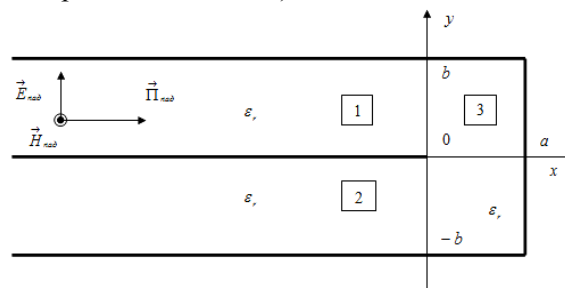


Рис. 5. Модель разворота на 180 градусов участка линзы Ротмана

Падающая волна имеет только z - компоненту магнитного поля:

$$\vec{H} = z_0 \cdot H_z.$$

У электрического поля могут быть две компоненты:

$$\vec{E} = \frac{\vec{rot}(\vec{E})}{i\omega\epsilon_0\epsilon_r} = \left(x_0 \frac{\partial H_z}{\partial y} - y_0 \frac{\partial H_z}{\partial x} \right). \quad (1)$$

Из области 1 падает ТЕМ-волна, которая является основным типом волны, переносящим подавляющую долю энергии:

$$\vec{H}_{nad}^{(1)} = z_0 \cdot H_{nad}^{(1)}, \quad (2)$$

$$H_{nad}^{(1)} = \exp(-ik_0\sqrt{\epsilon_r}x),$$

$$k_0 = 2\pi / \lambda_0,$$

$$\vec{E}_{nad}^{(1)} = y_0 \cdot E_{nad}^{(1)},$$

$$E_{nad}^{(1)} = \frac{k_0\sqrt{\epsilon_r}}{\omega\epsilon_0\epsilon_r} \exp(-ik_0\sqrt{\epsilon_r}x).$$

В спектре отраженных волн в области (1) будут присутствовать ТЕМ- волна и волноводные моды Е- типа (с продольной E_x - компонентой):

$$H_{omp}^{(1)} = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right), \quad (3)$$

где

$$\gamma_m^{(1)} = \sqrt{k_0^2\epsilon_r - \left(\frac{\pi m}{b}\right)^2}.$$

Электрическая компонента E_y - компоненты поля, касательной к границе раздела областей (1) и (3), а также – областей (2) и (3) при $x = 0$:

$$E_{omp}^{(1)} = \frac{-1}{i\omega\epsilon_0\epsilon_r} \sum_{m=0}^{\infty} A_m i\gamma_m^{(1)} \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right).$$

В области (2) магнитная и электрическая составляющие поля могут быть записаны в виде:

$$H^{(2)} = \sum_{m=0}^{\infty} B_m \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right). \quad (4)$$

Отметим, что под знаком экспоненты стоит величина $\gamma_m^{(1)}$, т.к. ширина областей (1) и (2) одинаковы

$$E^{(2)} = \frac{-1}{i\omega\epsilon_0\epsilon_r} \sum_{m=0}^{\infty} B_m i\gamma_m^{(1)} \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right).$$

В области (3), с учетом граничных условий при $y = \pm b$ и $x = a$:

$$H^{(3)} = \sum_{m=0}^{\infty} C_m \cos(\gamma_m^{(3)}(x-a)) \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right), \quad (5)$$

$$\gamma_m^{(3)} = \sqrt{k_0^2\epsilon_r - \left(\frac{\pi m}{2b}\right)^2},$$

$$E^{(3)} = \frac{1}{i\omega\epsilon_0\epsilon_r} \sum_{m=0}^{\infty} C_m \gamma_m^{(3)} \times \\ \times \sin\left(\gamma_m^{(3)}(x-a)\right) \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right)$$

Сшиваем касательные составляющие магнитного поля при $x = 0$:

$$\exp(-ik_0\sqrt{\epsilon_r}x) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \exp(i\gamma_m^{(1)}x) \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right) = \\ = \sum_{m=0}^{\infty} C_m \cos(\gamma_m^{(3)}(x-a)) \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right), \quad x = 0, \\ 1 + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right) = \\ = \sum_{m=0}^{\infty} C_m \cos(\gamma_m^{(3)}a) \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right) \quad (6)$$

Функцию $\cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right)$ представим в виде ряда:

$$\cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right) = \sum_{m=0}^{\infty} d_{m,1} \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right), \quad (7)$$

где

$$d_{m,1} = \frac{1}{2\pi} \int_0^b \cos\left(\frac{\pi m}{b}y\right) \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right) dy = \\ = \frac{b(m \sin(\pi m/2) - 2m \sin(\pi m))}{\pi^2(m^2 - 4m^2)}$$

Тогда условие $H^{(1)} = H^{(3)}$ при $x = 0$ будет выглядеть так:

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (A_m + \delta_{m,0}) d_{m,1} \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right) = \\ = \sum_{m=0}^{\infty} C_m \cos(\gamma_m^{(3)}a) \cos\left(\frac{\pi m}{2b}(y-b)\right) \quad (8)$$

где

$$\delta_{m,0} = \begin{cases} 1 & \text{при } m = 0 \\ 0 & \text{при } m \neq 0 \end{cases} - \text{символ Кронекера.}$$

Отсюда:

$$\sum_{m=0}^{\infty} (A_m + \delta_{m,0}) d_{m1,m} = C_{m1} \cos(\gamma_{m1}^{(3)} a), \quad (9)$$

где

$$m1 = 0, 1, \dots, \infty.$$

Сшиваем касательные компоненты электрического поля $E^{(1)} = E^{(3)}$ при $x = 0$:

$$\begin{aligned} \frac{ik_0 \sqrt{\varepsilon_r}}{i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} - \frac{1}{i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \sum_{m=0}^{\infty} A_m i \gamma_m^{(1)} \cos\left(\frac{\pi m}{b} y\right) = \\ = \frac{-1}{i\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \sum_{m1=0}^{\infty} C_{m1} \gamma_{m1}^{(3)} \sin(\gamma_{m1}^{(3)} a) \cos\left(\frac{\pi m1}{2b} (y-b)\right) \end{aligned}$$

подставив вместо $\cos\left(\frac{\pi m}{b} y\right)$ его выражение

по базисным функциям $\cos\left(\frac{\pi m1}{2b} (y-b)\right)$, получим:

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^{\infty} d_{m1,m} \left(ik_0 \sqrt{\varepsilon_r} \delta_{m,0} - A_m i \gamma_m^{(1)} \right) = \\ = -C_{m1} \gamma_{m1}^{(3)} \sin(\gamma_{m1}^{(3)} a) \end{aligned}, \quad (10)$$

где

$$m1 = 0, 1, \dots, \infty.$$

Сошьем $H^{(2)} = H^{(3)}$ при $x = 0$:

$$\sum_{m=0}^{\infty} B_m \cdot g_{m1,m} = C_{m1} \cos(\gamma_{m1}^{(3)} a), \quad (11)$$

где

$$m1 = 0, 1, \dots, \infty$$

$$\begin{aligned} g_{m1,m} = \frac{1}{2\pi} \int_{-b}^0 \cos\left(\frac{\pi m}{b} y\right) \cos\left(\frac{\pi m1}{2b} (y-b)\right) dy = \\ = \frac{2bm1 \sin(\pi m1/2) - 4bm \sin(\pi m) \left(2 \sin^2(\pi m1/2) - 1\right) + 2bm1 \sin(\pi m1) \left(2 \sin^2(\pi m/2) - 1\right)}{2\pi (\pi m1^2 - 4\pi m^2)}. \end{aligned}$$

Сошьем $E^{(2)} = E^{(3)}$ при $x = 0$:

$$\sum_{m=0}^{\infty} g_{m1,m} B_m i \gamma_m^{(1)} = C_{m1} \gamma_{m1}^{(3)} \sin(\gamma_{m1}^{(3)} a), \quad (12)$$

где

$$m1 = 0, 1, \dots, \infty.$$

Редуцируем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (9, 10, 11, 12), ограничив число волноводных мод в областях (1), (2), (3):

Пусть $m1 = 0, 1, \dots, M1 - 1$, где $M1$ - четное число.

Тогда, учитывая, что ширина областей (1) и (2) в направлении y одинакова,

$$m = 0, 1, \dots, \frac{M1}{2} - 1.$$

В подтверждении математической модели было проведено математическое моделирование и исследованы частотные зависимости модуля отражения и коэффициента передачи разворота на 180 градусов участка линзы Ротмана, выполненной на основе несимметричной полосковой линии. Толщина диэлектрика была выбрана – $b=0.762$ мм, диэлектрическая проницаемость 9.8, тангенс угла диэлектрических потерь 0.002 (Rogers TMM10i). На рис. 6 продемонстрированы вышеупомянутые зависимости.

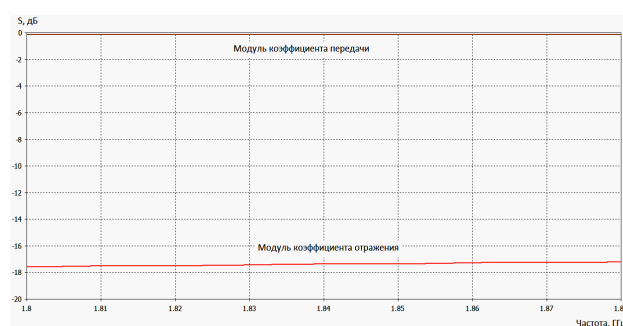


Рис. 6. Частотные зависимости модуля коэффициента отражения и коэффициента передачи

Заключение

Рассмотренная математическая модель процесса дифракции плоской электромагнитной волны Н-поляризации единичной амплитуды, реализованная при помощи сшивания систем линейных алгебраических уравнений, показала, что данная математическая модель является подтверждением возможности конструирования нашей модифицированной линзы Ротмана.

Также было проведено математическое моделирование макета модифицированной линзы Ротмана и показаны частотные зависимости коэффициента отражения и коэффициента пе-

редачи, из которых можно сделать вывод о конкурентоспособности данной антенной системы.

Литература

1. Rotman W. and Turner R.F. Wide-angle microwave lens for line source applications // IEEE Trans. Antennas Propag., 1963, vol. AP-11, no. 6, pp. 623–632, Nov.
2. Rausch E.O. and Peterson A.F. Low cost compact electronically scanned millimeter wave lens and method // U.S. Patent 6 031 501 A, Mar. 19, 1997.
3. Design considerations and technology assessment of phased-array antenna systems with RF MEMS for automotive radar applications / J. Schoebel et al. // IEEE Trans. Microw. Theory Techn., 2005, Jun, vol. 53, no. 6, pp. 1968–1975.
4. Fully integrated automotive radar sensor with versatile resolution / C. Metz et al. // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., 2001, vol. 2, pp. 1115–1118.
5. “Substrate integrated waveguide (SIW) rotman lens and its Ka-band multibeam array antenna applications / Y.J. Cheng et al. // IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 56, no. 8, pp. 2504–2513, Aug. 2008.
6. Zaghloul A.I. and Adler E.D. Compact Rotman lens using metamaterials // U.S. Patent 8 736 503 B2, May 27, 2014.
7. Tudosie G. and Vahldieck R. An LTCC-based folded Rotman lens for phased array applications // in Proc. Asia-Pacific Microw. Conf., Yokohama, Japan, Dec. 2006, pp. 2106–2109.
8. 60 GHz Rotman lens and new compact low loss delay line using LTCC technology,” / I.S. Song et al. // Proc. IEEE Radio Wireless Symp., Jan. 2009, pp. 663–666.
9. Beamforming lens antenna on a high resistivity silicon wafer for 60 GHz WPAN / W. Lee, J. Kim, C. S. Cho, and Y. J. Yoon // IEEE Trans. Antennas Propag., 2010, Mar, vol. 58, no. 3, pp. 706–713,
10. Lee W., Kim J., and Yoon Y.J. Compact two-layer Rotman lens-fed microstrip antenna array at 24 GHz // IEEE Trans. Antennas Propag., Feb, 2011, vol. 59, no. 2, pp. 460–466.
11. Folded Rotman lens multibeam antenna in SIW technology at 24 GHz / K. Tekkouk, M. Ettorre, R. Sauleau, and M. Casaletti // Proc. Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), Prague, Czech Republic, Mar. 2012, pp. 2308–2310.
12. Multibeam SIW slotted waveguide antenna system fed by a compact dual-layer Rotman lens / K. Tekkouk, M. Ettorre, L. Le Coq, and R. Sauleau // IEEE Trans. Antennas Propag., Feb, 2016, vol. 64, no. 2, pp. 504–514.
13. Hirokawa J. and Ando M. Single-layer feed waveguide consisting of posts for plane TEM wave excitation in parallel plates // IEEE Trans. Antennas Propag., May, 1998, vol. 46, no. 5, pp. 625–630,
14. Deslandes D. and Wu K. Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form // IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., Feb. 2001, vol. 11, no. 2, pp. 68–70.
15. Deslandes D. and Wu K. Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide // IEEE Trans. Microw. Theory Techn., Jun. 2006, vol. 54, no. 6, pp. 2516–2526.
16. Bozzi M., Georgiadis A., and Wu K. Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas // IET Microw. Antennas Propag., Jun. 2011, vol. 5, no. 8, pp. 909–920.
17. Djerfati T., Fonseca N.J.G., and Wu K. Broadband Substrate Integrated Waveguide 4×4 Nolen matrix based on coupler delay compensation // IEEE Trans. Microw. Theory Techn., Jul. 2011, vol. 59, no. 7, pp. 1740–1745.

Поступила 29.10.2020; принята к публикации 21.12.2020

Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадьевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84); ведущий инженер, ЗАО «ИРКОС» (129626, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternaky@mail.ru

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

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

MATHEMATICAL MODEL OF A MODIFIED ROTMAN LENS BASED ON AN ASYMMETRIC STRIPE LINE

Yu.G. Pasternak^{1,2}, V.A. Pendyurin³, F.S. Safonov²

¹JSC "IRKOS", Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

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

Abstract: Rotman printed lenses are one of the main promising directions for ray formation in multipath antenna arrays (MAA) due to their sufficient simplicity of construction and their wide-band properties, namely, due to the frequency overlap coefficient (it can reach 2-3 or even more). The principle of operation of such lenses is based on different paths of wave propagation within its structure, thanks to which the lens can work with an extremely wide frequency band. However, because of this, a new problem arises - an increase in the overall dimensions of the antenna system. As a result, this design is very difficult to integrate into a compact transceiver system. This problem is proposed to be solved by developing a more compact Rotman lens

folded in half. We explain this cardinal method of changing (reducing) the overall dimensions of the Rotman lens by the fact that the main type of wave that transfers the overwhelming share of energy is the TEM wave, for which there is practically no dispersion in microwave laminates with small losses. And for radar, radio direction finding and communication, these are the ways to solve technical difficulties. Before creating an experimental model or layout of the antenna array, it is necessary to conduct a number of experiments, calculations and confirm the specified technical characteristics of the PAA. In this paper, a mathematical model of the Rotman lens was created and calculated based on the fact that it was folded in half

Key words: mathematical model, modified Rotman lens, TEM wave

References

1. Rotman W., Turner R.F. "Wide-angle microwave lens for line source applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Nov. 1963, vol. AP-11, no. 6, pp. 623–632.
2. Rausch E.O., Peterson A.F. "Low cost compact electronically scanned millimeter wave lens and method," U.S. Patent 6 031 501 A, Mar. 19, 1997.
3. Schoebel J. *et al.* "Design considerations and technology assessment of phased-array antenna systems with RF MEMS for automotive radar applications," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, Jun. 2005, vol. 53, no. 6, pp. 1968–1975.
4. Metz C. *et al.*, "60 GHz integrated automotive radar sensor with versatile resolution," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2001, vol. 2, pp. 1115–1118.
5. Cheng Y.J. *et al.* "Substrate integrated waveguide (SIW) Rotman lens and its Ka-band multibeam array antenna applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Aug. 2008, vol. 56, no. 8, pp. 2504–2513.
6. Zaghloul A.I., Adler E.D. "Compact Rotman lens using metamaterials," U.S. Patent 8 736 503 B2, May 27, 2014.
7. Tudose G., Vahdieck R. "An LTCC-based folded Rotman lens for phased array applications," *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf.*, Yokohama, Japan, Dec. 2006, pp. 2106–2109.
8. Song I.S. *et al.*, "60 GHz Rotman lens and new compact low loss delay line using LTCC technology," *Proc. IEEE Radio Wireless Symp.*, Jan. 2009, pp. 663–666.
9. Lee W., Kim J., Cho C.S., Yoon Y.J. "Beamforming lens antenna on a high resistivity silicon wafer for 60 GHz WPAN," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Mar. 2010, vol. 58, no. 3, pp. 706–713.
10. Lee W., Kim J., Yoon Y.J. "Compact two-layer Rotman lens-fed microstrip antenna array at 24 GHz," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Feb. 2011, vol. 59, no. 2, pp. 460–466.
11. Tekkoku K., Ettorre M., Sauleau R., Casaletti M. "Folded Rotman lens multibeam antenna in SIW technology at 24 GHz," *Proc. Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Prague, Czech Republic, Mar. 2012, pp. 2308–2310.
12. Tekkoku K., Ettorre M., Le Coq L., Sauleau R. "Multibeam SIW slotted waveguide antenna system fed by a compact dual-layer Rotman lens," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Feb. 2016, vol. 64, no. 2, pp. 504–514.
13. Hirokawa J., Ando M. "Single-layer feed waveguide consisting of posts for plane TEM wave excitation in parallel plates," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, May 1998, vol. 46, no. 5, pp. 625–630.
14. Deslandes D., Wu K. "Integrated microstrip and rectangular waveguide in planar form," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, Feb. 2001, vol. 11, no. 2, pp. 68–70.
15. Deslandes D., Wu K. "Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, Jun. 2006, vol. 54, no. 6, pp. 2516–2526.
16. Bozzi M., Georgiadis A., Wu K. "Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas," *IET Microw. Antennas Propag.*, Jun. 2011, vol. 5, no. 8, pp. 909–920.
17. Djerfati T., Fonseca N.J.G., Wu K. "Broadband Substrate Integrated Waveguide 4×4 Nolen matrix based on coupler delay compensation," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, Jul. 2011, vol. 59, no. 7, pp. 1740–1745.

Submitted 29.10.2020; revised 21.12.2020

Information about the authors

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Leading Engineer of JSC "IRKOS" (21, Zvezdnyy avenue, Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

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

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

РАЗВЯЗКА АНТЕНН ВИВАЛЬДИ В СОСТАВЕ ММО АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

С.М. Фёдоров, Е.А. Ищенко, И.А. Зеленин, Е.В. Папина, Е.Д. Меньшикова, С.И. Деревянкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается ММО антенная решетка, сформированная из двух антенн Вивальди, которые должны обеспечить работу в частотном диапазоне, выделенном для сетей пятого поколения – 24,25-24,65 ГГц. Для определения основных параметров антенны применялось моделирование, на основе которого были установлены основные характеристики ММО антенной решетки: коэффициент корреляции огибающей, коэффициент усиления при разнесенном режиме, эффективность сложения. По результатам было определено, что при расстоянии между антеннами в 6,13 мм достигаются максимально возможные характеристики ММО антенной решетки, а для стабильного функционирования достаточным является расстояние в 2,45 мм. В статье приводятся размеры исследуемой антенны, графики обратных потерь (S_{11} - параметров), диаграммы направленности, коэффициентов корреляции огибающих, коэффициента усиления при разнесенном режиме, эффективности сложения при различных расстояниях между антенными элементами. Обеспечение стабильности работы ММО антенной решетки является важной задачей, так как все современные системы связи используют эту технологию для реализации многоканальной передачи, а следовательно, для повышения скорости передачи информации. Для определения геометрических характеристик и выполнения моделирования применялось специализированное программное обеспечение

Ключевые слова: ММО антенная решетка, коэффициент корреляции огибающей, коэффициент усиления при разнесенном режиме, эффективность сложения, связь пятого поколения, антенна Вивальди

Введение

Технология ММО является одной из основополагающих в построении систем связи. На ее основе построены все современные высокоскоростные системы связи, так как увеличение антенн в системе позволяет значительно повысить скорость передачи информации. Так, технология ММО лежит в основе:

- 1) Wi-Fi 5;
- 2) Wi-Fi 6;
- 3) 4G;
- 4) 5G.

Ввиду увеличения числа антенн происходит увеличение габаритных размеров антенной системы, что нежелательно, поэтому приходится искать баланс, который обеспечивает оптимальные характеристики при минимальных габаритах устройства.

Основные параметры ММО антенной решетки

Для ММО антенных решеток определяется ряд основных параметров [1], так применяемые антенны должны иметь низкий коэффициент корреляции огибающей (ЕСС) [2], максимально близкий к 10 коэффициент усиления при разнесенном режиме (DG) и обеспечивать

наилучшее сложение сигналов (МЕ) при приеме для их обработки [3]. При этом в качестве базовой антенны для исследования была выбрана антенна Вивальди, которая должна обеспечивать функционирование в диапазоне частот, который был выделен ГКРЧ для технологии 5G – 24,25-24,65 ГГц. Для расчетов параметров рекомендуется применять диаграммы направленности полученных антенн, а не S-параметры, так как при использовании картин полей полученные результаты являются более точными.

Основные параметры антенны Вивальди

Антенна Вивальди является одной из самых сложных с точки зрения электродинамического расчета, поэтому для определения ее характеристик применяют специализированное программное обеспечение.

Размеры антенны приведены в таблице, в качестве материала подложки был выбран Rogers RO4003C, который предназначен для работы в областях СВЧ, превышающих 10 ГГц и обладает следующими параметрами: $\varepsilon = 3,55$, $\mu = 1$, $Electric\ tand = 0,0027$; в качестве проводника была выбрана медь с толщиной 35 мкм.

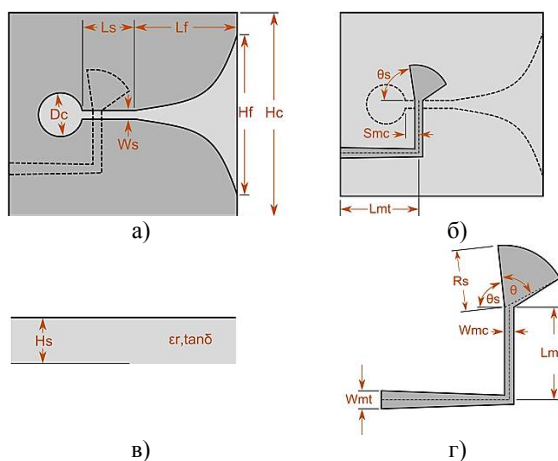


Рис. 1. Модель антенны с указанием параметров:
а) вид сверху; б) вид снизу; в) вид сбоку;
г) – вид линии питания

Размеры исследуемой антенны

Hf, мм	Lf, мм	Hc, мм	Dc, мкм	Smc, мкм	Lmc, мкм	Wmc, мкм
7,42	14,18	9,45	952,5	84,37	952,5	168,7
Lmt, мм	Wmt, мкм	Ls, мкм	Ws, мкм	Rs, мкм	$\theta_s, ^\circ$	Hs, мкм
2,07	470	168,7	69,65	750,3	90	203

В процессе моделирования были определены S_{11} параметры исследуемой антенны, которые приведены на рис. 2.

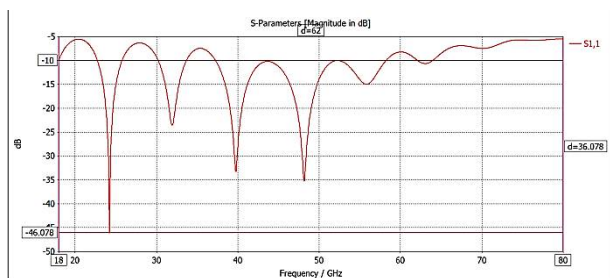


Рис. 2. Полученные S_{11} параметры антенны Вивальди

В качестве диапазонов работы антенн принято использовать те участки, на которых значение обратных потерь ниже -10 дБ. По полученной картине видно, что антенна имеет пять рабочих диапазонов:

- 1) 22,75 – 25,78 ГГц, минимальное значение обратных потерь: -46,2 дБ (24,225 ГГц);
- 2) 30,24 – 33,70 ГГц, минимальное значение обратных потерь: -23,57 дБ (31,897 ГГц);
- 3) 37,26 – 58,22 ГГц, минимальное значение обратных потерь: -35,27 дБ (48,166 ГГц);
- 4) 62,11 – 64 ГГц, минимальное значение обратных потерь: -10,67 дБ (63,013 ГГц).

При этом типовая диаграмма направленности данной антенны приведена на рис. 3.

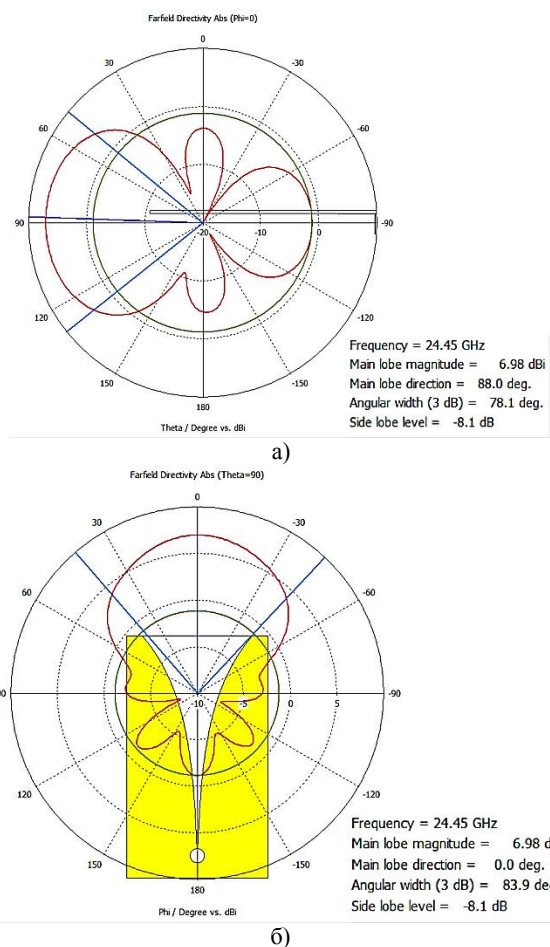


Рис. 3. Полученные диаграммы направленности антенны Вивальди: а) при $\varphi = 0^\circ$; б) при $\theta = 90^\circ$

На основе полученной антенны Вивальди была сформирована ММО антенная решетка, причем расстояние между антеннами определялось относительно значения:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{24,45 \cdot 10^9 \text{ Гц}} = 12,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Исследование влияния расстояния между элементами на характеристики ММО антенной решетки

В процессе исследования рассматривались 5 ситуаций, так вид исследуемой ММО антенной решетки приведен на рис. 4, а в качестве опорных точек были выбраны:

- 1) $0,05\lambda = 0,61 \text{ мм}$;
- 2) $0,1\lambda = 1,23 \text{ мм}$;
- 3) $0,2\lambda = 2,45 \text{ мм}$;
- 4) $0,5\lambda = 6,13 \text{ мм}$;
- 5) $1\lambda = 12,26 \text{ мм}$.

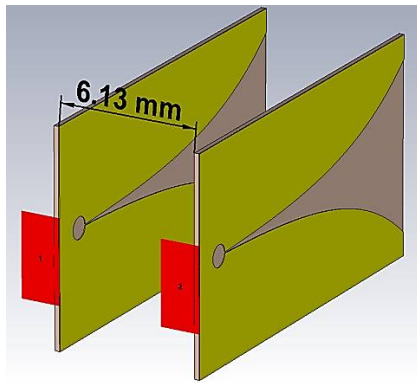


Рис. 4. Вид исследуемой ММО антенной решетки

На основе проведенного моделирования были получены основные параметры ММО антенной решетки, так на рис. 5 приведены графики коэффициента корреляции огибающей (ЕСС).

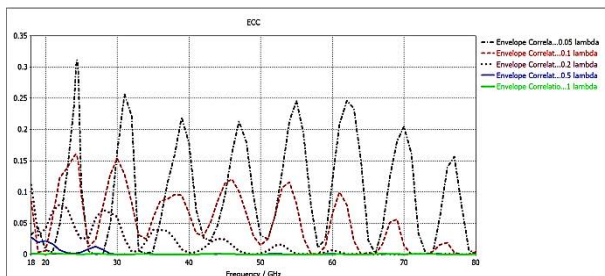


Рис. 5. Коэффициент корреляции ММО антенной решетки

Как видно по полученным результатам при расстоянии между антенными элементами $0,2\lambda$ (2,45 мм) коэффициент корреляции не превышает 0,1, а следовательно, антенная решетка будет функционировать стабильно без нарушения режимов работы. На рис. 6 приведен коэффициент усиления при разнесенном режиме для рассматриваемой ситуации.

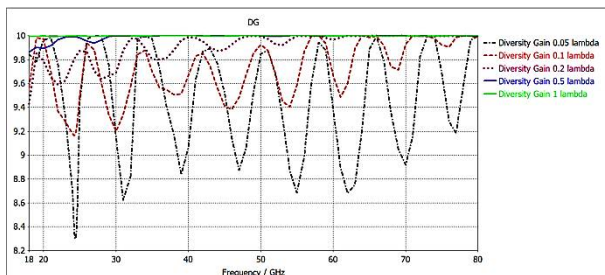


Рис. 6. Коэффициент усиления при разнесенном режиме ММО антенной решетки

По полученным графикам видно, что при расстоянии между антеннами в $0,2\lambda$ значение данного параметра не опускается ниже 9, что

соответствует стабильному режиму работы ММО антенной решетки. На рис. 7. приведен график эффективности сложения для ММО антенной решетки.

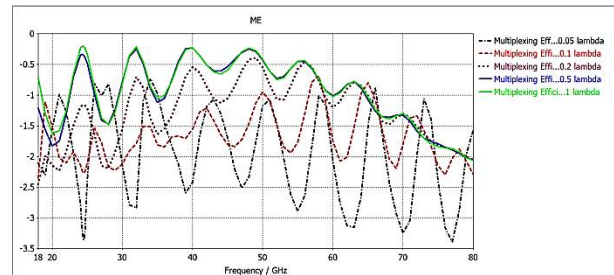


Рис. 7. Эффективность сложения ММО антенной решетки

При расстоянии между антенными элементами, равному $0,2\lambda$ значение данного параметра не падает ниже -2,5 дБ, однако особенность данного параметра состоит в том, что важную роль в его расчете составляют КПД антенн.

Заключение

В процессе моделирования был произведен анализ ММО антенной решетки, которая была сформирована из двух антенн Вивальди. По результатам видно, что при расстоянии между антеннами равно $0,2\lambda$ (2,45 мм) достигается оптимальный режим работы.

Применение ММО антенной решетки позволяет значительно улучшить характеристики канала связи, так как повышается скорость работы системы при работе в диапазонах СВЧ. При этом, если расстояние между антеннами равно $0,5\lambda$ (6,13 мм), параметры антенной системы достигают максимума, а следовательно, дальнейшее увеличение расстояния не приносит преимуществ в работе системы.

Литература

1. Исследование влияния расстояния между антеннами в ММО антенной решетке для сетей пятого поколения / Антипов С.А., Ищенко Е.А., Кострова В.Н., Разинкин К.А., Стежкин Д.А., Фёдоров С.М. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 4. С. 109-116.
2. Blanch S., Romeu J., Corbella I. Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description // Electronics letters. 2003. V. 39. № 9. Pp. 705-707
3. Tian R., Lau B.K., Ying Z. Multiplexing Efficiency of MIMO Antennas // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2011. V. 10. Pp. 183-186.

Информация об авторах

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Зеленин Иван Алексеевич – старший преподаватель кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29

Папина Елизавета Владимировна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

Меньшикова Екатерина Дмитриевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: menshulya77@inbox.ru

Деревянкин Сергей Игоревич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: derevyankin_sergej@bk.ru

INTERCONNECTION OF VIVALDI ANTENNAS IN THE MIMO ANTENNA ARRAY

S.M. Fyedorov, E.A. Ishchenko, I.A. Zelenin, E.V. Papina, E.D. Men'shikova, S.I. Derevyankin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses a MIMO antenna array formed of two Vivaldi antennas, which should provide operation in the frequency range allocated for fifth generation networks - 24.25-24.65 GHz. To determine the main parameters of the antenna, we applied modeling, on the basis of which we determined the main characteristics of the MIMO antenna array: the envelope correlation coefficient, the diversity gain, the multiplexing efficiency. According to the results, we determined that with a distance between antennas of 6.13 mm, the maximum possible characteristics of a MIMO antenna array are achieved, and a distance of 2.45 mm is sufficient for stable operation. The article gives the dimensions of the antenna under study, graphs of return loss (S11 - parameters), radiation patterns, envelope correlation coefficient, diversity gain, multiplexing efficiency at different distances between the antenna elements. Ensuring the stability of the MIMO antenna array is an important task since all modern communication systems use this technology to implement multichannel transmission, and, consequently, to increase the information transfer rate. We used specialized software to determine geometric characteristics and perform modeling

Key words: MIMO antenna array, envelope correlation coefficient, diversity gain, multiplexing efficiency, fifth generation communications, Vivaldi antenna

References

1. Antipov S.A., Ishchenko E.A., Kostrova V.N., Razinkin K.A., Stezhkin D.A., Fyedorov S.M. "Investigation of the influence of the distance between antennas in MIMO antenna array for fifth generation communications", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 4. pp 109-116.
2. Blanch S., Romeu J., Corbella I. "Exact representation of antenna system diversity performance from input parameter description", *Electronics Letters*, 2003, vol. 39, no. 9, pp. 705-707.
3. Tian R., Lau B.K., Ying Z. "Multiplexing efficiency of MIMO antennas", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011, vol. 10, pp. 183-186

Submitted 18.11.2020; revised 21.12.2020

Information about the authors

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Evgeniy A. Ishchenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Ivan A. Zelenin, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29

Elizaveta V. Papina, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: cool.pykhtina@mail.ru

Ekaterina D. Men'shikova, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: menshulya77@inbox.ru

Sergey I. Derevyankin, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: derevyankin_sergej@bk.ru

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.36622/VSTU.2020.16.6.017

УДК 621.86

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ РИСКОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛИФТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**Ю.Н. Скорская¹, П.В. Витчук¹, В.Ю. Анцев², Н.Н. Трушин²****¹Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Калуга, Россия****²Тульский государственный университет, г. Тула, Россия**

Аннотация: приведены исследования, относящиеся к тематическому направлению оценки риска эксплуатации лифтового оборудования при помощи статистического подхода. Субъективность методов квалиметрической оценки снижения рисков эксплуатации лифтов дала возможность авторам предложить статистический подход к оценке во всех случаях, где это возможно. Наиболее сложными и ответственными этапами анализа и оценки риска эксплуатации лифтового оборудования является сбор информации, необходимой для установления законов распределения сроков службы и определения гамма-процентных ресурсов его конструктивных элементов, а также детальное изучение всех обстоятельств возникновения этих отказов. Анализ статистических данных, проведенный авторами, позволил исследовать долговечность отдельных элементов лифтового оборудования и использовать эти данные для оценки срока службы и обоснования рисков эксплуатации как лифта в целом, так и отдельных его элементов. А проведение анализа причин выхода из строя элементов оборудования позволило дать оценку необходимости проведения мероприятий по повышению их сроков службы, надежности и качества обслуживания. Современные методы компьютерной обработки информации в сочетании с внедрением системы самодиагностики лифтового оборудования могут существенно повысить эффективность системы технического обслуживания лифтов, а своевременное диагностирование – минимизировать аварии и обеспечить безопасность передвижения

Ключевые слова: лифт, риск, отказ, безопасность, статистический подход

Введение

Лифт является основным средством вертикального перемещения людей в зданиях и сооружениях. Повышение этажности строительства обуславливает повсеместное широкое применение пассажирских и грузопассажирских лифтов отечественных и зарубежных производителей различного конструктивного исполнения. При этом лифт является объектом повышенной опасности, а его эксплуатация сопряжена с возможностью возникновения аварийных ситуаций и наступлением негативных технико-экономических и социальных последствий. В соответствии с требованиями регламента Таможенного Союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования» (пункт 7, статья 4) для подтверждения соответствия продукции разрабатываемое проектировщиком «Обоснование безопасности» должно содержать анализ и обоснование рисков [1]. Поэтому оценка уровня безопасности лифтов является актуальной задачей.

Постановка задачи

ГОСТ Р 53387–2009 (ИСО/ТС 14798-2009) «Лифты, эскалаторы и пассажирские конвейеры. Методология анализа и снижения риска» регламентирует методологию анализа и снижения рисков для лифтов (рис. 1), используя в качестве основного подхода применение методов квалиметрической оценки [2]. Аналогичный подход используется для других подъемно-транспортных машин [3–6]

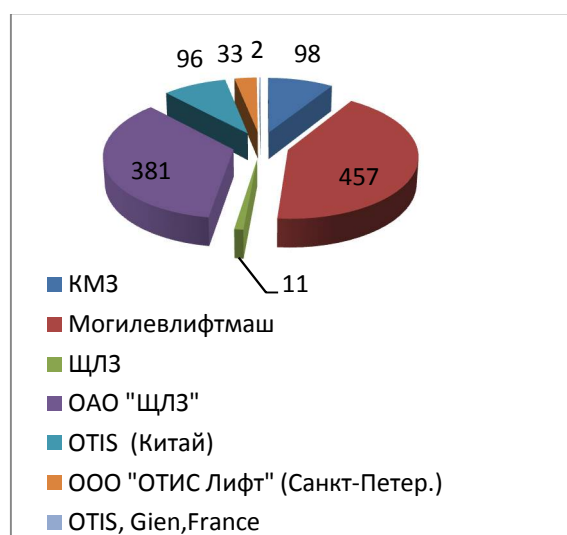


Рис. 1. Блок-схема выполнения анализа и снижения рисков по ГОСТ Р 53387-2009

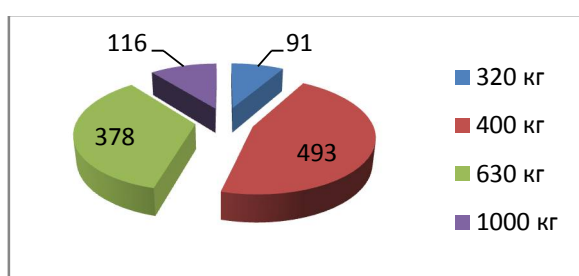
При этом в ГОСТ Р 53387-2009 отмечается возможность учета статистических данных. Так как методы квалиметрической оценки достаточно субъективны, авторами предлагается для всех случаев анализа рисков, где такая возможность существует, применить статистический подход.

Решение сформулированной задачи

В рамках представленного в данной статье исследования были рассмотрены пассажирские и грузопассажирские лифты нескольких конструктивных типов различных производителей с грузоподъемностью от 400 до 1000 кг. Распределение числа исследованных лифтов по моделям и по номинальной грузоподъемности представлено на рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Распределение данных о лифтах:
а) по моделям; б) по номинальной грузоподъемности

Основная нагрузка находящихся в эксплуатации лифтов распределяется на лифты грузоподъемностью 400 и 630 кг отечественных производителей и производителей республики Беларусь.

На рис. 3 представлено распределение лифтов по годам выпуска. Основная часть из них находится в эксплуатации 15 лет и более.

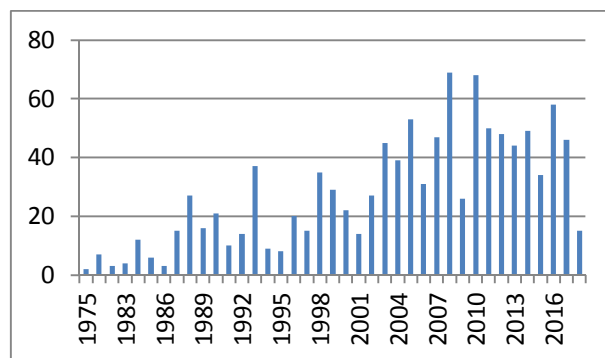


Рис. 3. Распределение числа лифтов по годам выпуска

Анализ дефектных ведомостей позволил сформировать общий перечень дефектов лифтов. На основании этого перечня можно утверждать, что существенная доля приходится на дефекты, обусловленные изнашиванием конструктивных элементов (износ канатов, подшипниковых узлов, тормозов и др.). Несколько меньшее число дефектов связано с нарушением правил эксплуатации (отсутствие ограждений, аварийного освещения и др.). Сроки службы элементов лифтового оборудования являются случайными величинами, зависящими от ряда факторов. Оценить вероятность достижения требуемой долговечности возможно, исследовав ее распределение [7]. Знание законов распределения долговечности основных элементов позволит оценить целесообразность повышения их срока службы. Основными этапами определения долговечности можно выделить:

- составление упорядоченных статистических рядов и их обработка;
- построение графиков статистической функции распределения сроков службы $F(t)$;
- построение гистограмм статистической плотности распределения $f(t)$;
- определение основных числовых характеристик распределения (математического ожидания, дисперсии, среднего квадратического отклонения, коэффициента вариации, асимметрии и эксцесса);
- построение моделей отказов наблюдаемых элементов;
- определение законов распределения сроков службы;
- установление теоретических значений функции и плотности распределения;
- проверка сходимости теоретических и статистических значений функции распределения по критерию согласия Пирсона;
- оценка параметров распределения графоаналитическим методом;
- определение квантилей распределения;

- определение гамма-процентных ресурсов.

Поэлементный анализ показывает, что гистограммы практически всех сроков службы элементов близки к экспоненциальному закону распределения, а гистограмма сроков службы тягового каната близка к нормальному распределению. Это подтверждается небольшим отклонением в асимметрии $S_k = 0,53$ и значением коэффициента вариации $V = 0,47$.

В качестве вероятности нанесения ущерба может быть использована вероятность отказа $Q(t)$:

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (1)$$

где $f(t)$ – плотность вероятности возникновения отказов.

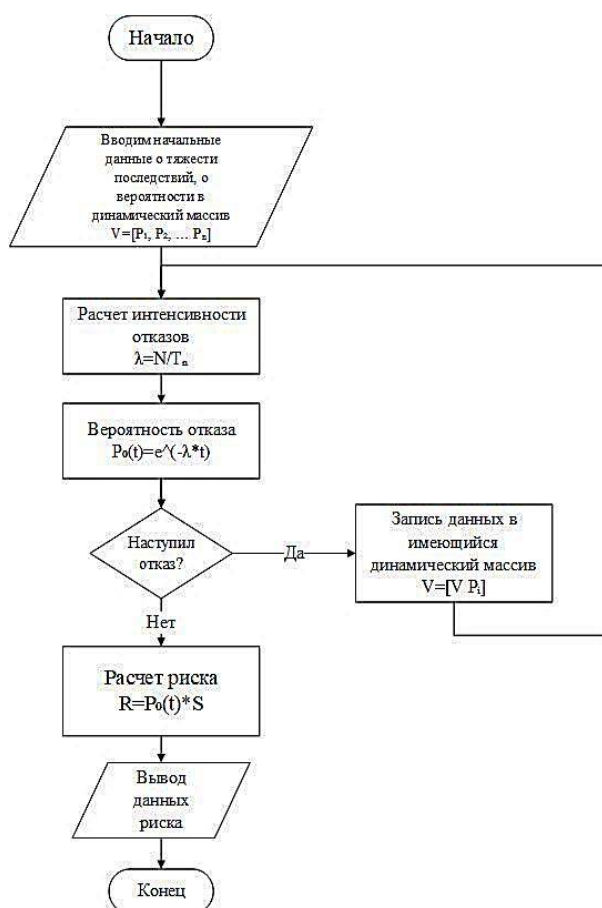


Рис. 4. Блок-схема программного комплекса

Полученные результаты планируется использовать при реализации программного комплекса, позволяющего автоматизировать анализ риска в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 4.

Заключение

Реализация предлагаемых мероприятий позволит автоматизировать процесс оценки надежности и анализа эксплуатации лифтов, что может крайне благоприятно отразиться в долгосрочной перспективе. Своевременное диагностирование позволит минимизировать аварии и обеспечить безопасность передвижения.

Литература

1. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» (ТР ТС 010/2011).
2. ГОСТ Р 53387–2009 (ИСО/ТС 14798-2009) «Лифты, эскалаторы и пассажирские конвейеры. Методология анализа и снижения риска».
3. Лагерева Е.А., Лагерева И.А. Вероятностная оценка надежности гидропривода кранов-манипуляторов путем имитационного моделирования потока отказов элементов // Приводы и компоненты машин. 2012. № 2-3. С. 2-5.
4. Емельянова Г.А. Методология повышения надежности грузоподъемного оборудования при обеспечении требуемых критериев риска: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.02. М., 2016. 384 с.
5. Анцев В.Ю., Витчук П.В. Обеспечение долговечности лифтовых канатопроводящих шкивов // Тяжелое машиностроение. 2013. № 11-12. С. 37-41
6. Горынин А.Д. Анализ риска эксплуатации грузоподъемных машин на стадии их проектирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Тула, 2018. 173 с.
7. Новиков В.К. Основы теории анализа опасностей и оценки риска аварий. М.: Издательство: Альтаир, МГАВТ, 2017. Тип доступа URL: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=483864

Поступила 22.10.2020; принята к публикации 17.12.2020

Информация об авторах

Скорская Юлия Николаевна - старший преподаватель, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (248000, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, 2), e-mail: sun978@yandex.ru, тел. +7 (910) 6017657
Витчук Павел Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (248000, Россия, г. Калуга, ул. Баженова, 2), e-mail: zzzventor@ya.ru, тел. +7 (920) 8888114, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-5056>

Анцев Виталий Юрьевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, просп. Ленина, 92), e-mail: anzev@tsu.tula.ru, тел. +7 (903) 8402872, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5854-5789>

Трушин Николай Николаевич – д-р техн. наук, доцент, профессор, Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, просп. Ленина, 92), e-mail: trushin@tsu.tula.ru, тел. +7 (910) 1529154

APPLICATION OF A STATISTICAL APPROACH TO THE ANALYSIS OF RISKS OF LIFT EQUIPMENT OPERATION

Yu.N. Skorskaay¹, P.V. Vitchuk¹, V.Yu. Antsev², N.N. Trushin²

¹Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga, Russia

²Tula State University, Tula, Russia

Abstract: the article presents studies related to the thematic area of risk assessment of the operation of elevator equipment using a statistical approach. The subjectivity of the methods of qualimetric assessment of reducing the risks of operating elevators made it possible to propose a statistical approach to assessment in all cases where it is possible. The most difficult and crucial stages of the analysis and risk assessment of the operation of elevator equipment is the collection of information necessary to establish the laws of distribution of service life and determine the gamma-percentage resources of its structural elements, as well as a detailed study of all the circumstances of these failures. The analysis of statistical data that we carried out made it possible to investigate the durability of individual elements of the elevator equipment and use these data to assess the service life and substantiate the risks of operating both the elevator as a whole and its individual elements. And the analysis of the reasons for the failure of equipment elements made it possible to assess the need for measures to increase their service life, reliability, and quality of service. Modern methods of computer processing of information in combination with the introduction of a self-diagnostic system for elevator equipment can significantly increase the efficiency of the elevator maintenance system, and timely diagnostics can minimize accidents and ensure the safety of operation

Key words: lift, risk, failure, safety, statistical approach

References

1. Technical regulations of the Customs Union "On the safety of machinery and equipment" (TR CU 010/2011).
2. GOST R 51901.1-2002. "Risk management. Risk analysis of technological systems" (ISO/CU 14798-2009)
3. Lagerev A.V., Lagereva E.A., Lagerev I.A. "Probabilistic estimation of reliability of hydraulic drive of cranes-manipulators by simulation of failure flow of elements", *Drives and Components of Machines (Privody i Komponenty Mashin)*, 2012, no. 2-3, pp. 2-5.
4. Emel'yanova G.A. "Methodology for improving the reliability of lifting equipment while ensuring the required risk criteria" ("Metodologiya povysheniya nadezhnosti gruzopod"yemnogo oborudovaniya pri obespechenii trebuyemykh kriteriyev riska"), Dr. of Tech. Sci. dis., Moscow, 2017, 384 p.
5. Antsev V.Yu., Vitchuk P.V. "Ensuring the long-life of lift rope-carrying pulleys", *Heavy Engineering (Tyazheloe mashinostroyeniye)*, 2013, no. 11-12, pp. 37-41.
6. Gorynin A.D. "Analysis of the risk of operation of cargo-lifting machines at the stage of their design: dis. candidate of engineering" ("Analiz riska ekspluatatsii gruzopod"yemnykh mashin na stadii ikh proektirovaniya"), Cand. of Tech. Sci. dis., Tula, 2018, 173 p.
7. Novikov V.K. "Fundamentals of the theory of hazard analysis and accident risk assessment" ("Osnovy teorii analiza opasnostey i otsenki riska avariyn"), Altair, MGA VT, 2017, http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=483864.

Submitted 22.10.2020; revised 17.12.2020

Information about the authors

Yuliya N. Skorskaay, Assistant Professor, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch) (2 Bazhenova str., Kaluga 248000, Russia), e-mail: sun978@yandex.ru, tel. +7 (910) 6017657

Pavel V. Vitchuk, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch) (2 Bazhenova str., Kaluga 248000, Russia), e-mail: zzzventor@ya.ru, tel. +7 (920) 8888114, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7916-5056>

Vitaliy Yu. Antsev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of Department, Tula State University (92 Lenina prospekt, Tula 300012, Russia), e-mail: anzev@tsu.tula.ru, tel. +7 (903) 8402872, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5854-5789>

Nikolay N. Trushin, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor, Tula State University (92 Lenina prospekt, Tula 300012, Russia), e-mail: trushin@tsu.tula.ru, tel. +7 (910) 1529154

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ ТИТАНА

А.Б. Булков, В.В. Пешков, И.Б. Корчагин, Г.В. Селиванов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: цель данной работы - установление влияния физико-химического состояния контактных поверхностей титана, характеризующихся толщиной оксидных пленок, охрупченных и газонасыщенных слоев, на их взаимодействие при диффузионной сварке. Исследования проводились на цилиндрических образцах из титанового сплава ОТ4, контактная поверхность одного образца представляла собой круговой конус с углом при вершине 120° , второй образец имел плоскую поверхность. Формирование поверхностных слоев производилось путем отжига образцов в вакууме 2,6 Па при температуре 750°C в течение 10 мин, что сопровождалось образованием на контактных поверхностях оксидных пленок толщиной 51,5 нм, охрупченных слоев глубиной $\sim 3,5$ мкм и газонасыщенных слоев глубиной до 16 мкм. Частичное удаление газонасыщенного слоя с контактных поверхностей перед диффузионной сваркой осуществлялось регламентированным химическим травлением в смеси азотной и плавиковой кислот. Диффузионная сварка выполнялась при температуре 900°C и давлении 5 МПа в течение 3 мин в вакууме $3 \cdot 10^{-2}$ Па с дополнительной защитой от окисления экраном из титановой фольги. Качество сварного соединения оценивали путем испытаний на статическое растяжение, визуальной оценкой топографии поверхностей разрушения и определением содержания кислорода в поверхностных слоях рентгено-спектральным микроанализом. Установлено, что при диффузионной сварке титана параметром, характеризующим физико-химическое состояние контактных поверхностей и ответственным за развитие процесса их взаимодействия, является толщина поверхностного охрупченного слоя. Удаление перед сваркой с предварительно окисленных контактных поверхностей охрупченного слоя обеспечивает развитие процесса образования химических связей между свариваемыми поверхностями и формирование диффузионного соединения с прочностью на уровне основного металла, а при удалении несколько большей толщины охрупченного слоя – рост прочности при испытаниях на статический разрыв

Ключевые слова: титан, отжиг, газонасыщенные слои, прочность, топография

Введение

Одним из основных факторов, влияющих на развитие процесса диффузионной сварки, является физико-химическое состояние контактных поверхностей, определяющее их реакционную способность к образованию металлических связей. Во многих работах [1–3 и др.] при анализе кинетики процесса диффузионной сварки титана и его сплавов в качестве характеристики физико-химического состояния контактных поверхностей рассматриваются оксидные пленки, как основное препятствие образованию металлических связей между свариваемыми поверхностями.

В то же время в условиях безокислительного отжига титан обладает высокой способностью к «самоочищению» от оксидов за счет растворения кислорода оксидных пленок в металлической основе титана. Оценочные расчеты, выполненные с использованием данных, приведенных в работе [2], показывают, что, например, при 800°C для очистки поверхности от естественной оксидной пленки толщиной ~ 3

нм требуется всего 0,02 с, а пленки толщиной ~ 53 нм потребуются около 6 с.

Однако экспериментальные исследования, выполненные, например, на сплаве ОТ4, показали, что для восстановления реакционной способности к схватыванию поверхностей, предварительно окисленных при 600°C на воздухе до синего цвета (соответствует толщине оксидной пленки $\sim 51,5$ нм [4]), требуется более 10^3 с, что значительно превышает расчетные значения.

Известно, что при нагреве процесс взаимодействия титана с газами (в первую очередь с кислородом) сопровождается не только образованием оксидных пленок, но и растворением газа в металлической основе, что приводит к газонасыщению и формированию охрупченных поверхностных слоев [5].

При этом толщина охрупченных слоев, образующихся на поверхности сплава ОТ4 после вакуумного отжига, например, при 600°C , более чем в 10 раз превышает толщину образующихся оксидных пленок, и эта разница с повышением температуры отжига возрастает [5].

Поэтому целью данной работы было установление влияния физико-химического состояния контактных поверхностей титана, характеризующихся толщиной оксидных пленок,

охрупченных и газонасыщенных слоев, на их взаимодействие при диффузионной сварке.

Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводили на образцах из сплава ОТ4, имитирующих микровыступы на свариваемых поверхностях (рис. 1). Финишной механической обработкой контактных поверхностей было полирование до $R_z=0,1$ мкм.

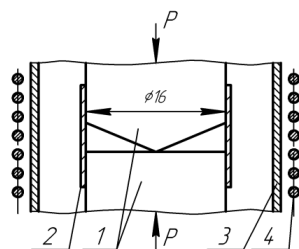


Рис. 1. Схема процесса диффузионной сварки: 1 – свариваемые образцы, 2 – экран из титановой фольги, 3 – стенка вакуумной камеры, 4 – нагреватель

Затем образцы обезжиривали и отжигали в вакууме 2,6 Па при температуре 750 °С в течение 10 мин, что сопровождалось образованием на контактных поверхностях оксидных пленок синего цвета спектра первого порядка, что соответствовало их толщине 51,5 нм [4], охрупченных слоев глубиной ~3,5 мкм, оцененных по излому образцов–свидетелей при их разрушении трехточечным изгибом (рис. 2) и газонасыщенных слоев глубиной до 16 мкм, выявленных по микротвердости, замеренной на приборе ПМТ–3 при нагрузке на индентор 0,5 Н.

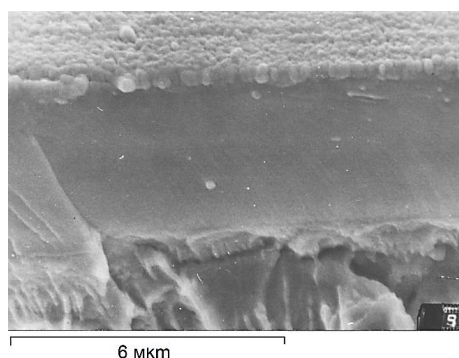


Рис. 2. Типичный вид в изломе охрупченного слоя на сплаве ОТ4, сформировавшегося в процессе отжига при 750 °С в течение 10 мин в вакууме 2,6 Па

При этом микротвердость окисленных поверхностей составляла 8,75 ГПа, а концентрация кислорода, которая определялась рентгено-спектральным микроанализом (РСМА) по методике [6], составляла 45,16 % ат.

Для достижения поставленной в работе цели перед диффузионной сваркой с контактных поверхностей отожженных образцов регламентированным химическим травлением в смеси азотной и плавиковой кислот последовательно удаляли оксидные пленки, охрупченные и газонасыщенные слои со скоростью съема ~1 мкм/мин. После травления для удаления продуктов химической реакции свариваемые поверхности образцов дополнительно подполировывали и определяли их относительную микротвердость $HV_{отн}$ ($HV_{отн} = HV/HV_m$, где HV – измеренная микротвердость поверхности; HV_m – микротвердость поверхности до окисления, равная 3,2 ГПа).

Подготовленные таким образом образцы сваривали при температуре 900 °С и давлении 5 МПа в течение 3 мин в вакууме $3 \cdot 10^{-2}$ Па с дополнительной защитой от окисления экраном из титановой фольги, выполняющим роль геттера (рис. 1). Сжимающее давление прикладывали к образцам после достижения ими температуры сварки.

Используемая форма образцов и режимы сварки обеспечивали стабильное развитие физического контакта на площади, составляющей ~30 % площади сечения цилиндрической части образца. При этом основную роль в развитии процесса взаимодействия свариваемых поверхностей играло их исходное физико-химическое состояние.

Для количественной оценки развития процесса взаимодействия контактных поверхностей сваренные образцы испытывали на статическое растяжение для определения относительной прочности соединения $\sigma_{отн}$ ($\sigma_{отн} = P/(F \cdot \sigma_s)$, где P – усилие разрушения; F – площадь физического контакта; σ_s – предел прочности сплава ОТ4 в исходном состоянии равный 740 МПа).

После механических испытаний проводился анализ поверхностей разрушения (их топографии и содержания кислорода) с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) и РСМА для определения на них относительной концентрации кислорода $[O]_{отн}$ ($[O]_{отн} = [O]/[O]_m$, где $[O]$ – концентрация кислорода на поверхности разрушения сварного соединения; $[O]_m$ – концентрация кислорода на поверхности разрушения сплава ОТ4 в исходном состоянии, равная 0,32% ат.).

Результаты экспериментальных исследований

О влиянии глубины съема поверхностного слоя, сформировавшегося в процессе предвари-

тельного вакуумного отжига на свариваемых поверхностях (см. рис. 2), на значения относительной микротвердости контактных поверхностей перед сваркой $HV_{отн}$, прочность схватывания $\sigma_{отн}$, относительную концентрацию кислорода на них $[O]_{отн}$ и топографию поверхностей разрушения можно судить по экспериментальным данным, приведенным на рис. 3, 4.

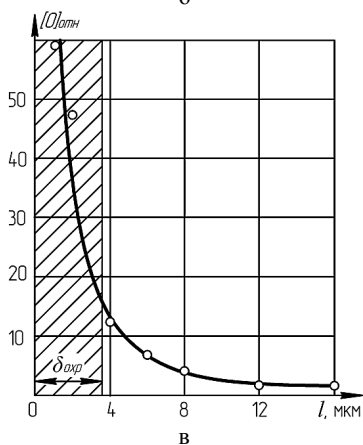
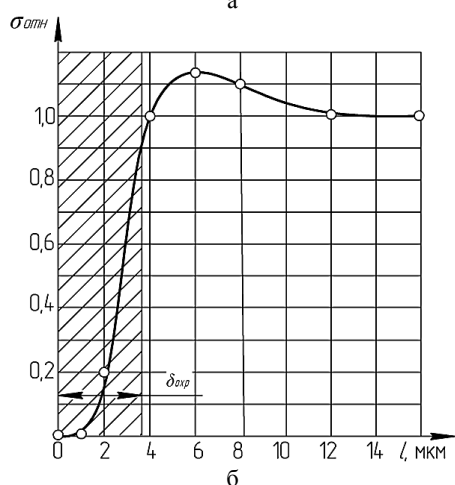
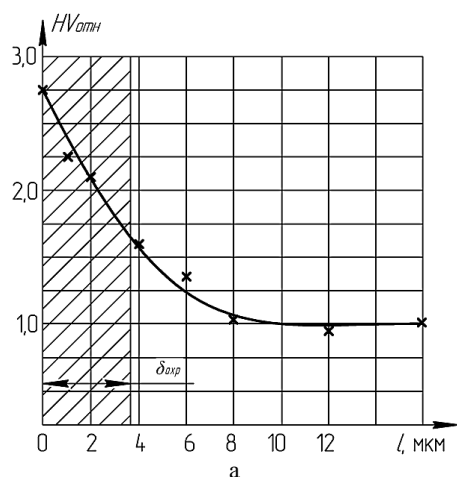


Рис. 3. Влияние глубины съема поверхностного оксидного слоя на значения: а – микротвердости свариваемых поверхностей образцов ($HV_{отн}$); б – относительной прочности сварных соединений ($\sigma_{отн}$); в – относительной концентрации кислорода на поверхности разрушения сварного соединения ($[O]_{отн}$)

Из этих данных следует, что съем поверхностного слоя величиной 1,0 мкм, обеспечивающий полное удаление оксидных пленок со свариваемых поверхностей, хотя и сопровождается понижением их микротвердости, но прочность соединения, как и в исходном состоянии, равняется нулю, а на поверхностях разрушения, характеризуемых достаточно высоким содержанием кислорода (рис. 3, в), присутствуют только отдельные очаги взаимодействия, характеризуемые наличием слабо развитых гребней отрыва (рис. 4, б). Топография этих поверхностей мало чем отличается от топографии контактных поверхностей после сварки без предварительного съема части поверхностного слоя (рис. 4, а).

Съем поверхностного слоя на глубину ~2,0 мкм (что соответствует ~0,6 от величины исходного охрупченного слоя (рис. 2)) сопровождается уменьшением микротвердости свариваемых поверхностей и развитием процесса схватывания, но относительная прочность соединения при этом не превышает 0,2 от предела прочности основного материала (рис. 3, а, б), а поверхность разрушения, характеризуемая высоким содержанием кислорода (рис. 3, в), имеет ярко выраженный мелкопластинчатый хрупкий излом, формирующийся при транскристаллитном распространении трещин (рис. 4, в).

Полное удаление со свариваемых поверхностей исходного охрупченного слоя ($l=4,0$ мкм) приводит к понижению концентрации кислорода на них (о чем свидетельствует снижение микротвердости, рис. 3, а) и образованию при сварке диффузионного соединения с пределом прочности на уровне свариваемого сплава (рис. 3, б). Топография поверхности разрушения характеризуется значительной неоднородностью и присутствием участков с «ямочным» рельефом небольшой глубины, что свидетельствует о невысокой пластичности металла в зоне сварного соединения (рис. 4, г). При этом концентрация кислорода на поверхности разрушения сварного соединения превышает концентрацию на поверхности разрушения сплава ОТ4 в исходном состоянии приблизительно в 12 раз (рис. 3, в) и составляет 3,8 % ат.

Удаление перед сваркой с контактных поверхностей оксидных и газонасыщенных слоев на глубину $l \geq 6,0$ мкм приводит к понижению значений $HV_{отн}$ и $[O]_{отн}$ и росту $\sigma_{отн}$ (рис. 3). При этом зависимость $\sigma_{отн} = \varphi(l)$ имеет экстремальный характер с наличием максимума при $l=6,0$ мкм. Прочность диффузионного соединения оказывается выше прочности сплава ОТ4 в состоянии поставки: $\sigma_{отн}=1,14$. Дальнейшее удаление по-

верхностных слоев перед сваркой ($l > 6,0$ мкм) сопровождается снижением $\sigma_{отн}$ до 1,0.

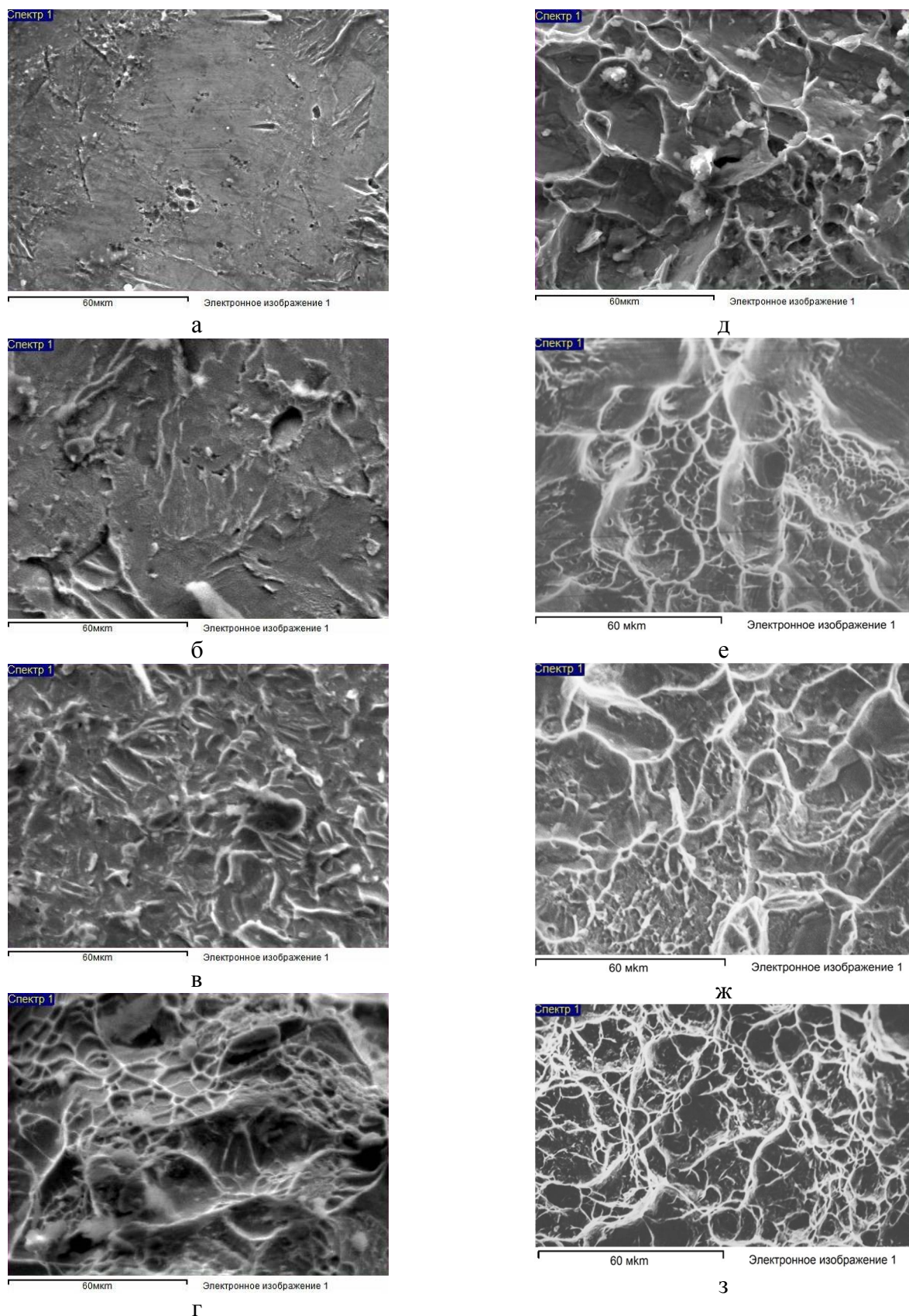


Рис. 4. Топография поверхности разрушения диффузионного соединения без предварительного съема части поверхностного слоя – а и после удаления поверхностного слоя на глубину l , мкм: 1 – б; 2 – в; 4 – г; 6 – д; 8 – е; 12 – ж; 16 – з

Повышенные значения $\sigma_{отн}$ при $l=6,0$ мкм могут быть обусловлены увеличенным содержанием кислорода в зоне соединения ($[O]_{отн}=7,52$ ($[O]=2,4$ % ат) рис. 3, в), что приводит к упрочнению металла за счет искажения его кристаллической решетки растворенным кислородом.

О положительном влиянии удаления поверхностного окисленного слоя на глубину $l \geq 6,0$ мкм на развитие процесса диффузионной сварки свидетельствует и топография поверхностей разрушения диффузионных соединений (рис. 4, д–ж), характеризующая формированием «ямочного» рельефа по механизму зарождения, роста и слияния микронесплошностей. При этом с увеличением глубины съема поверхностного слоя, сопровождаемым снижением $HV_{отн}$ и $[O]_{отн}$ (рис. 3, а, в), однородность поверхностей изломов сварных соединений, характеризующая размером ямок, их диаметром и глубиной, возрастает (рис. 4, д–з).

Выводы

На примере сварки образцов из сплава ОТ4, на контактных поверхностях которых присутствовали оксидные пленки, охрупченные и газонасыщенные слои, установлено следующее.

1. При диффузионной сварке титана параметром, характеризующим физико–химическое состояние контактных поверхностей и ответственным за развитие процесса их взаимодействия, является толщина поверхностного охрупченного слоя $\delta_{охр}$, включающего в себя оксид и часть газонасыщенного слоя.

2. Удаление перед сваркой с предварительно окисленных контактных поверхностей слоя $l \approx \delta_{охр}$ обеспечивает развитие процесса образования химических связей между свариваемыми поверхностями и формирование диффузионного соединения с прочностью на уровне основного металла при испытаниях на статический разрыв.

3. При удалении с предварительно окисленных контактных поверхностей слоя $l \approx 1,7\delta_{охр}$ обеспечивается повышение прочности диффузионного соединения до уровня, превышающего прочность основного металла примерно на 14% (до 844 МПа для сплава ОТ4) за счет упрочнения сплава кислородом.

Литература

1. Диффузионная сварка титана / Э.С. Каракозов, Л.М. Орлова, В.В. Пешков, В.И. Григорьевский. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
2. Диффузионная сварка титана и его сплавов / А.В. Бондарь, В.В. Пешков, Л.С. Киреев, В.В. Шурупов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1998. 256 с.
3. Киреев Л.С., Пешков В.В., Селиванов В.Ф. Физико–химия процесса получения пористо–компактных материалов на основе титана / под ред. Б.Е. Патона. Киев: Изд-во ИЭС им. Е.О. Патона, 2003. 317 с.
4. Окисление титана и его сплавов / А.С. Бай, Д.И. Лайнер, Е.Н. Слесарева, М.И. Цыпин. М.: Металлургия, 1970. 320 с.
5. Влияние вакуумного отжига на топографию поверхностей разрушения и повторно–статическую выносливость сплава ОТ4 / А.Б. Булков, В.В. Пешков, А.Б. Коломенский и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 6. С. 113–119.
6. Пешков В.В., Булков А.Б., Куцев С.Б. Особенности развития процесса диффузионной сварки титановых тонкостенных слоистых конструкций с тавровым соединением // Сварочное производство. 2018. № 12. С. 9–18.

Поступила 30.10.2020; принята к публикации 17.12.2020

Информация об авторах

Булков Алексей Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. 8(960) 124–38–11, e-mail: abulkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7326-4846>

Пешков Владимир Владимирович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. 8(473) 278–38–84, e-mail: vlvlpeshkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-6574>

Корчагин Илья Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. 8(950)756–82–83, e-mail: ikorchagin@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2399-2319>

Селиванов Георгий Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. 8(473)278-38-84, e-mail: selivanovgv@bk.ru

INFLUENCE OF THE PHYSICO-CHEMICAL STATE OF CONTACT SURFACES ON THE DEVELOPMENT OF THE PROCESS OF DIFFUSION WELDING OF TITANIUM

A.B. Bulkov, V.V. Peshkov, I.B. Korchagin, G.V. Selivanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the aim of this work is to establish the influence of the physico-chemical state of the contact surfaces of titanium, characterized by the thickness of oxide films, embrittled and gas-saturated layers, on their interaction during diffusion welding. Investigations were carried out on cylindrical specimens of titanium alloy OT4, the contact surface of one specimen was a circular cone with an apex angle of 120°, the second specimen had a flat surface. The formation of the surface layers was carried out by annealing the samples in a vacuum of 2.6 Pa at a temperature of 750° C for 10 min, which was accompanied by the formation on the contact surfaces of oxide films 51.5 nm thick, embrittled layers ~ 3.5 µm deep and gas-saturated layers up to 16 µm. Partial removal of the gas-saturated layer from the contact surfaces before diffusion welding was carried out by regulated chemical etching in a mixture of nitric and hydrofluoric acids. Diffusion welding was carried out at a temperature of 900° C and a pressure of 5 MPa for 3 min in a vacuum of $3 \cdot 10^{-2}$ Pa with additional protection against oxidation by a titanium foil screen. The quality of the welded joint was assessed by static tensile tests, visual assessment of the topography of the fracture surfaces and determination of the oxygen content in the surface layers by X-ray spectral microanalysis. We established that in diffusion welding of titanium, the parameter characterizing the physico-chemical state of contact surfaces and responsible for the development of the process of their interaction is the thickness of the surface embrittled layer. The removal of the embrittled layer from the pre-oxidized contact surfaces before welding ensures the development of the process of the formation of chemical bonds between the surfaces to be welded and the formation of a diffusion joint with strength at the level of the base metal, and when removing a slightly larger thickness of the embrittled layer, an increase in strength during static rupture tests

Key words: titanium, annealing, gas-saturated layers, strength, topography

References

1. Karakozov E.S., Orlova L.M., Peshkov V.V., Grigor'evskiy V.I. "Diffusion welding of titanium" ("Diffuzionnaya svarka titana"), Moscow, Metallurgiya, 1977, 272 p.
2. Bondar' A.V., Peshkov V.V., Kireev L.S., Shurupov V.V. "Diffusion welding of titanium and its alloys" ("Diffuzionnaya svarka titana i ego splavov"), Voronezh State University Publishing House, 1998, 256 p.
3. Kireev L.S., Peshkov V.V., Selivanov V.F. "Physics and chemistry of the process of obtaining porous-compact materials based on titanium" ("Fiziko-khimika protsessa polucheniya poristo-kompaktnykh materialov na osnove titana"), Kiev, Publishing house of the IES E.O. Paton, 2003, 317 p.
4. Bay A.S., Layner D.I., Slesareva E.N., Tsipin M.I. "Oxidation of titanium and its alloys" ("Okislenie titana i ego splavov"). Moscow, Metallurgiya, 1970, 320 p.
5. Bulkov A.B., Peshkov V.V., Kolomenskiy A.B., et al. "Influence of vacuum annealing on the topography of fracture surfaces and re-static endurance of the OT4 alloy", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 6, pp. 113-119.
6. Peshkov V.V., Bulkov A.B., Kushchev S.B. "Features of the development of the process of diffusion welding of thin-walled titanium laminated structures with a T-joint", *Welding Production (Svarochnoe proizvodstvo)*, 2018, no. 12, pp. 9-18.

Submitted 30.10.2020; revised 17.12.2020

Information about the authors

Aleksey B. Bulkov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: abulkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7326-4846>
Vladimir V. Peshkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vlvpeshkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-6574>
Il'ya B. Korchagin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ikorchagin@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2399-2319>
Georgiy V. Selivanov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: selivanovgv@bk.ru