

На правах рукописи



БАРАННИКОВ Илья Андреевич

**СИНТЕЗ ПЛАНАРНЫХ АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ
ПРЕДНАМЕРЕННЫХ ДЕФЕКТОВ СЛОЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ**

Специальность 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель **Фёдоров Сергей Михайлович**, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж

Официальные оппоненты:

Бородулин Роман Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор 11 кафедры (радиосвязи), ФГКВОУ ВО «Военная орденов Жукова и Ленина Краснознаменная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», г. Санкт-Петербург

Разиньков Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электрооборудования (и оптико-электронных систем), ФГКВОУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж


Ведущая организация ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

Защита состоится «8» октября 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.03 в конференц-зале ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский просп., 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» <https://cchgeu.ru/>.

Автореферат разослан «7» июля 2026 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета 24.2.286.03,
д.т.н., профессор

 Белецкая Светлана Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные приемо-передающие радиосистемы предъявляют все растущие требования к габаритам и характеристикам антенно-фидерных устройств. При этом диапазоны рабочих частот этих систем все увеличиваются, что делает планарные антенно-фидерные устройства все более привлекательными из-за их компактности и относительной простоты процесса изготовления печатных плат. Одним из способов упрощения конструкций печатных антенн, а также улучшения их характеристик является использование различных типов структур преднамеренных дефектов слоя земли (или же структур дефектов земли, ПДСЗ) печатной платы.

Модификации антенн, использующих ПДСЗ, обладают рядом преимуществ перед традиционными вариантами:

- возможность формирования более простых линий согласования;
- подавление побочных гармоник;
- расширение диапазона рабочих частот;
- снижение взаимного влияния элементов антенных решеток между собой;
- подавление нежелательных поляризаций.

Однако, несмотря на достоинства, использование ПДСЗ в антенно-фидерном тракте также сопряжено и с некоторыми недостатками:

- нарушение целостности слоя земли печатной платы, которое может отразиться на параметрах передающих линиях;
- наличие излучения со стороны слоя земли, так как структуры дефектов будут выступать в качестве резонаторных щелей и формировать свое собственное излучение на некоторых частотах;
- низкая скорость проектирования из-за отсутствия четкой методологии, позволяющей определить характеристики ПДСЗ в зависимости от их размеров и параметров подложки.

Все это ограничивает широкое распространение и применение ПДСЗ при проектировании современных антенно-фидерных систем. Основным ограничивающим фактором при этом является отсутствие методик их проектирования, использующих прямые расчетные зависимости для получения характеристик структур, а не сложные обобщенные методы электродинамического моделирования в сочетании с итерационным перебором параметров. Следовательно, разработка быстрого и надежного способа проектирования ПДСЗ является одной из наиболее актуальных.

Степень разработанности темы. Наиболее значительный вклад в тему был внесен зарубежными исследователями: E. Yablonovitch, S. John, J. D. Joannopoulos, E. Ozbay, D. Ahn, K. M. Ho, C. T. Chan, A. S. Barlevy, C. S. Kim, J. S. Park, D. J. Woo, T. K. Lee, J. W. Lee, M. K. Mandal, X. Wang, B. Wang, S. Y. Huang, H. J. Chen, T. H. Huang, C. S. Chang, L. S. Chen, D. Guha, A. K. Arya, A. Patnaik, and M. V. Kartikeyan, S. N. Burokur, Z. Z. Hou, H. W. Liu. Среди отечественных ученых можно выделить В.А. Калошина, С.Е. Банкова, И.Б. Вендик, А.С. Русакова, В.Е. Кутепова, И.В. Пешкова, В.Н. Яценко.

Было дано общее определение ПДСЗ, а также рассмотрены различные геометрии: гантелеобразные, спиралевидные, U-образные, V-образные, H-образные, T-образные, E-образные, крестовые, концентрические кольца, искаженные F. Были изучены характеристики сложных ПДСЗ в форме разделенных круговых резонаторов и фракталов. Для оценки добротности и характеристик ПДСЗ авторами работ приводились их эквивалентные схемы, а также предлагались возможные способы их проектирования и моделирования. Были рассмотрены практические приложения структур ПДСЗ для формирования согласующих цепей, подавления побочных гармоник высшего порядка антенн и снижение связи между элементами антенных решеток.

В то же время многие вопросы, касающиеся процесса разработки и проектирования самих ПДСЗ и конструкций с их применением остаются недостаточно проработанными:

- методология проектирования ПДСЗ для формирования фильтров;
- физические связи между размерами ПДСЗ и эквивалентными параметрами фильтра;
- разработка малогабаритных фильтров, использующих ПДСЗ;
- разработка делителей мощности, реализованных на основе ПДСЗ;
- разработка антенн, использующих согласующие линии на основе ПДСЗ.

Объектом исследования являются структуры преднамеренных дефектов слоя заземления печатной платы.

Предметом исследования являются методики и способы расчета, проектирования различных антенно-фидерных устройств СВЧ-диапазона, использующих структуры преднамеренных дефектов слоя заземления печатной платы, а также их электродинамические характеристики.

Целью работы является разработка методик проектирования геометрии структур преднамеренных дефектов слоя заземления печатной платы, исследование способов их применения в различных конструкциях антенно-фидерных устройств СВЧ-диапазона с целью повышения их рабочих характеристик.

Достижение поставленной цели потребовало **решения следующих задач:**

- анализа современного состояния и перспективных тенденций развития радиоэлектронных устройств, использующих ПДСЗ, а также существующих методик их проектирования;
- разработки методики сбора данных о гантелеобразных ПДСЗ и выбор методов проведения дальнейшего регрессионного анализа;
- исследования и разработки методик проектирования гантелеобразных структур преднамеренных дефектов слоя заземления, а также проведения проверки их работоспособности в приложении ПДСЗ для формирования согласования антенн и подавления их побочных гармоник высшего порядка;
- проведения натурных экспериментальных исследований антенно-фидерных устройств, использующих в своей конструкции ПДСЗ с целью верификации, полученных с помощью электродинамического моделирования характеристик конструкций.

Научная новизна работы состоит в следующем:

– методика расчета гантелеобразного ПДСЗ в форме простой гантели на основе явных эмпирических зависимостей между частотой полюса затухания, частотой среза, геометрическими размерами и параметрами подложки, отличающаяся возможностью прямого синтеза геометрических параметров ПДСЗ без итерационного электродинамического моделирования и сокращающая время проектирования в 2.8 и 4.37 раза по сравнению с методом роя частиц и эволюционной стратегии адаптации матрицы ковариации соответственно;

– модель в форме явной расчетной зависимости для определения параметров эквивалентной цепи простой гантелеобразной структуры по ее геометрическим размерам и характеристикам подложки, отличающаяся учетом влияния конструктивных параметров ПДСЗ на параметры эквивалентной схемы и позволяющая оценить влияние отдельных параметров ПДСЗ на характер вносимого им сопротивление;

– модель, устанавливающая связь между геометрическими параметрами ПДСЗ в виде заполненной гантели, характеристиками подложки и частотой первого резонанса, отличающаяся возможностью прямого определения геометрических параметров по требуемой резонансной частоте и служащая основой для методики расчета геометрии ПДСЗ, сокращающей время проектирования в 4.77 и 2.67 раза по сравнению с методом роя частиц и эволюционной стратегией адаптации матрицы ковариации соответственно;

– методика построения делителя Уилкинсона с использованием гантелеобразных ПДСЗ для обеспечения изоляции выходных портов, отличающаяся отказом от балансного резистора и реализацией устройства в виде полностью печатной двусторонней структуры и обеспечивающая упрощение технологии изготовления при сохранении характеристик, сопоставимых с традиционной конструкцией.

Теоретическая значимость работы заключается в нахождении явных расчетных зависимостей, связывающих размеры простого гантелеобразного ПДСЗ, параметры подложки с частотами полюса затухания и среза. Установлена взаимосвязь предложенных формул прямого расчета и параметров эквивалентной цепи простого гантелеобразного ПДСЗ. Найдена явная расчетная зависимость между размерами заполненного гантелеобразного ПДСЗ, параметрами подложки и его частотой первого резонанса. Исследовано влияние ПДСЗ на микрополосковый фидерный тракт.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики проектирования простой гантелеобразной ПДСЗ, позволяющей уменьшить время проектирования за счет перехода от итеративного подбора к прямым расчетам, и обладающей высокой точностью. Для ПДСЗ в форме заполненной гантелеобразной структуры была получена формула прямого расчета, позволяющая получить первое приближение размеров дефекта на основании требования к его первой резонансной частоте. Также было получено практическое приложение ПДСЗ в делителе Уилкинсона, упрощающее процесс изготовления и повышающее надежность конструкции.

Методология и методы исследования. При выполнении исследований использовались методы регрессионного анализа, в частности, метод наименьших

квадратов, а также численный метод Левенберга-Марквардта. При обработке данных использовалась кросс-валидация, а для их получения – математического моделирования в электродинамике (метод конечного интегрирования и метод матриц передачи).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

– методика проектирования гантелеобразных ПДСЗ на основе явных расчетных зависимостей, связывающих геометрические размеры структуры и параметры подложки с частотами полюса затухания и среза, отличающаяся переходом от оптимизационного поиска к непосредственному расчету параметров структуры и обеспечивающая сокращение времени проектирования в 2.8 и 4.37 раза по сравнению с методом роя частиц и эволюционной стратегией адаптации матрицы ковариации соответственно;

– модель, связывающая характеристики конструкции простого гантелеобразного ПДСЗ с параметрами его эквивалентной цепи, отличающаяся представлением параметров эквивалентной схемы через геометрические размеры структуры и характеристики подложки и позволяющая оценивать влияние размеров ПДСЗ на его реактивное сопротивление;

– модель, устанавливающая связь между геометрическими параметрами ПДСЗ в форме заполненной гантели, характеристиками подложки и частотой первого резонанса, отличающаяся возможностью прямого определения резонансной частоты по параметрам конструкции и обеспечивающая сокращение времени проектирования в 4.77 и 2.67 раза по сравнению с методом роя частиц и эволюционной стратегией адаптации матрицы ковариации соответственно;

– способ построения делителей мощности Уилкинсона с использованием частотно-избирательных свойств гантелеобразных ПДСЗ для реализации балансных элементов, отличающийся отказом от сосредоточенных элементов и обеспечивающий создание полностью планарных конструкций делителей мощности.

Степень достоверности полученных в работе результатов обусловлена применением известных методов электродинамического моделирования, регрессионного анализа, а также экспериментальной верификацией расчетных результатов. Для получения наборов данных проводилось электродинамическое моделирование в CST Studio Suite 2025, регрессионный анализ проводился на основании реализации метода наименьших квадратов в MATLAB. Полученные результаты соответствуют ранее полученным результатам исследований других авторов и не противоречат фундаментальным законам физики, теории и техники антенно-фидерных устройств. Теоретическое обоснование полученных результатов проводилось с использованием фундаментальных законов электродинамики, теории и техники антенн. При проведении натурных измерений использовалось поверенное измерительное оборудование компании Rohde&Schwarz. Результаты измерений подтвердили достоверность электродинамического моделирования.

Апробация работы. Основные результаты работы, полученные в ходе исследований, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (г. Воронеж, 2024); Международная научная

конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации «Шарыгинские чтения» (г. Томск, 2024); 65 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ (г. Воронеж, 2025); XXXII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2026).

Реализация и внедрение результатов работы.

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы внедрены в АО НВП «ПРОТЕК», АО «НКТБ «Феррит». Также, результаты работы внедрены в образовательный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ», дисциплина «Электродинамика и распространение радиоволн».

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертации, были использованы в следующих научно-исследовательских работах, в которых автор являлся исполнителем:

- государственное задание № FZGM-2024-0003 по созданию молодежной лаборатории «Помехоустойчивых систем связи и управления наземными и воздушными беспилотными роботизированными аппаратами»;
- государственное задание № FZGM-2023-0011 «Разработка и исследование аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего функциональность беспилотных летательных аппаратов малого радиуса действия»;
- государственное задание № FZGM-2024-0006 «Разработка и исследование принципов создания системы обнаружения беспилотных летательных аппаратов с использованием аэромобильных антенных систем»;
- государственное задание № FZGM-2025-0002 «Разработка и исследование принципов создания технического комплекса защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов на основе мультисенсорных систем обнаружения».

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 13 работах, из них 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 работ опубликовано в сборниках трудов научных конференций, получено 1 свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в получении основных результатов, изложенных в диссертационном исследовании. Существующие методы анализа в электродинамике, применяемые при моделировании структур, рассматривались в [1]. В работах [2, 3, 13] были предложены методики проектирования и расчета отдельных классов радиоэлектронных устройств. Необходимость улучшения характеристик планарных антенн была отмечена в работах [4, 5], что подчеркивает необходимость их улучшения посредством структур преднамеренных дефектов. Работы [6-10] посвящены рассмотрению различных структур являющихся частями многолучевых антенн, в частности их фидерной части, которая определяет направление луча диаграммы направленности, где также могут применяться ПДСЗ для упрощения процесса изготовления и снижения себестоимости устройств. Модификации делителя мощности Уилкинсона на основе ПДСЗ были исследованы в работах [11, 12], где было показано, что характеристики при применении ПДСЗ не изменились, однако

сама конструкция значительно упростилась за счет исключения монтажа балансного резистора.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует п. 2 «Исследование характеристик антенн и микроволновых устройств для их оптимизации и модернизации, что позволяет осваивать новые частотные диапазоны, обеспечивать электромагнитную совместимость, создавать высокоэффективную технологию и т. д.», п. 3 «Исследование и разработка новых антенных систем, активных и пассивных микроволновых устройств, в том числе управляющих, фазизирующих, экранирующих и других, с существенно улучшенными параметрами», п. 9 «Разработка методов автоматизированного проектирования и оптимизации антенных систем и микроволновых устройств широкого применения» паспорта специальности 2.2.14. Антенны, устройства СВЧ и их технологии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 108 наименований и 1 приложения. Основная часть работы изложена на 160 страницах, содержит 138 рисунков и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, изложена научная новизна, обоснованы теоретическая и практическая ценность работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, обозначен личный вклад автора.

В первой главе выполняется анализ современного состояния и перспектив развития методологии и технологий планарных антенно-фидерных устройств. Выполнен анализ основных общих методов электромагнитного моделирования, введено понятие преднамеренных дефектов слоя заземления (ПДСЗ) печатных плат и обозначены их основные области приложения. Проведен обзор основных методов моделирования и проектирования структур ПДСЗ различной геометрии и сделаны выводы о недостатках существующих подходов. На их основании были сформулированы основные задачи, решение которых позволит сформировать методику проектирования ПДСЗ, ускоряющую получение параметров геометрии дефекта для достижения требуемых характеристик, что является целью диссертационного исследования.

Во второй главе установлены явные расчетные зависимости для двух типов ПДСЗ с помощью регрессионного анализа: “простая гантель” и “заполненная гантель”; связывающие геометрию структур и характеристики материала подложки с конечными параметрами ПДСЗ. На основе данных зависимостей составлены методики проектирования ПДСЗ.

Первым этапом исследования было составление набора данных для ПДСЗ “простая гантель”. Для этого проводилось параметризованное электромагнитное моделирование структуры. Внешний вид и некоторые параметры структуры приводятся на Рисунке 1.

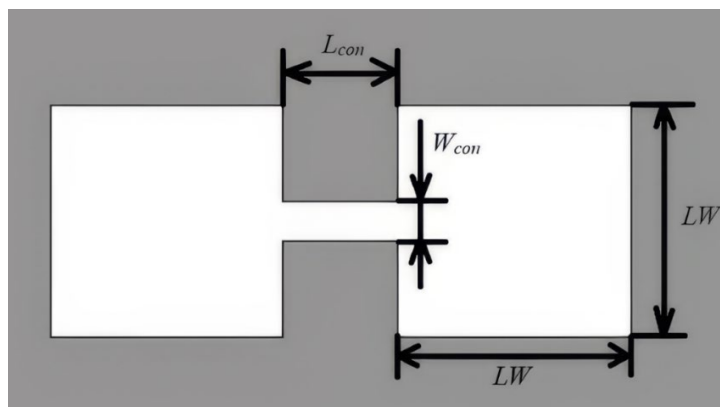


Рисунок 1 – Внешний вид ПДСЗ “простая гантель”

Диэлектрическая проницаемость подложки E_r , сторона квадрата LW (мм) и длина соединительной щели L_{con} (мм) менялись от 2 до 12 с шагом 2. Ширина щели W_{con} от 1 мм до 4 мм с шагом 0.5 мм и толщина подложки изменялась от 1 мм до 3 мм с шагом 1. Такой выбор параметров моделирования дает набор из 3150 точек для окончательного набора данных. Эти пределы изменения модели сразу же позволяют обозначить границы применимости и валидности последующей модели по геометрии структуры и материалу подложки: LW , L_{con} от 2 до 12 мм; W_{con} от 1 мм до 4 мм; толщина подложки от 1 до 3 мм, а ее диэлектрическая проницаемость от 2 до 12.

Далее был проведен анализ зависимости частоты полюса затухания F_{min} (ГГц) для ПДСЗ “простая гантель” от каждого параметра модели в отдельности для определения первичного вида зависимости частоты от всех параметров геометрии, после чего она была уточнена до окончательного вида:

$$F_{min} = 1 / (0.014795 \cdot LW + 0.007251 \cdot L_{con} - 0.012839 \cdot W_{con} + 0.010822 \cdot T_{sub} + 0.006949 \cdot E_r) - 1.4 \quad (1)$$

Коэффициенты полученной формулы продемонстрировали (исходя из значений стандартной ошибки) устойчивость и являются статистически значимыми (исходя из р-значений) (Таблица 1).

Таблица 1 – Значения коэффициентов и их статистические оценки для зависимости частоты полюса затухания от геометрии ПДСЗ “простая гантель” и параметров подложки.

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t-статистика	р-значение
a ₁	0.014795	5.2279 ⁻⁰⁵	283.003	0
a ₂	0.007251	4.3427 ⁻⁰⁵	166.97	0
a ₃	-0.012839	9.8473 ⁻⁰⁵	-130.38	0
a ₄	0.010822	0.00014	76.095	0
a ₅	0.006949	3.9412 ⁻⁰⁵	176.322	0

При этом полученная зависимость обладает высокой точностью: среднее квадратическое отклонение (СКО) составило 0.0488, коэффициент детерминации (R^2) 0.975. Также были получены диаграмма остатков и график распределений расстояний Кука, подтверждающие точность зависимости (1).

Зависимость для частоты среза F_{cut} ПДСЗ “простая гантель” была получена по такой же методике:

$$F_{cut} = 1 / (0.03195 \cdot LW + 0.01035 \cdot L_{con} - 0.00385 \cdot W_{con} + 0.02327 \cdot E_r - 0.02922 \cdot T_{sub}) - 0.7 \quad (2)$$

Ее коэффициенты устойчивы и значимы, исходя из их статистических оценок (Таблица 2).

Таблица 2 – Значения коэффициентов и их статистические оценки для формулы зависимости F_{cut} от геометрии ПДСЗ “простая гантель” и параметров подложки.

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение
a1	0.03195	0.00014	222.38	0
a2	0.01035	0.00011	97.41	0
a3	-0.00385	0.00027	-14.40	3.1924 ⁻⁴⁵
a4	0.02327	0.00013	175.65	0
a5	-0.02922	0.00031	-93.42	0

СКО формулы составляет 0.0286, а $R^2 = 0.961$, что показывает ее высокую точность в границах валидности. Как и ранее, дополнительно точность была подтверждена диаграммой остатков и графиком распределения расстояний Кука.

Полученные формулы (1) и (2) были привязаны к эквивалентной схеме ПДСЗ “простая гантель”, которая представляет собой фильтр Баттерворта, сводящийся к простой резонансной LC-цепи:

$$C = \frac{5f_c}{\pi(f_0^2 - f_c^2)} n\Phi, \quad (3)$$

$$L = \frac{250}{(\pi f_0)^2 C} n\Gamma n. \quad (4)$$

где f_0 и f_c – частоты полюса затухания и среза, выраженные в ГГц, С и L емкость и индуктивность эквивалентной цепи. Тогда введя замены:

$$A = a_1 \cdot LW + a_2 \cdot L_{con} + a_3 \cdot W_{con} + a_4 \cdot T_{sub} + a_5 \cdot E_r, \quad (5)$$

$$B = b_1 \cdot LW + b_2 \cdot L_{con} + b_3 \cdot W_{con} + b_4 \cdot E_r + b_5 \cdot T_{sub}. \quad (6)$$

Можно прийти к расчетным выражениям для эквивалентной схемы, основывающихся не на значениях частот, а на размерах ПДСЗ и параметров подложки:

$$C = \frac{5\left(\frac{1}{B} - 1.4\right)}{\pi\left(\left(\frac{1}{A} - 1.4\right)^2 - \left(\frac{1}{B} - 0.7\right)^2\right)} = \frac{\frac{5 - 4B}{B}}{\pi\frac{(B + A - 2.1A \cdot B)(B - A - 0.7A \cdot B)}{(A \cdot B)^2}}, \quad (7)$$

$$L = \frac{250}{\left(\pi\left(\frac{1}{A} - 1.4\right)\right)^2 C}. \quad (8)$$

Далее на основании выражений (1), (2) и (7), (8) была сформулирована окончательная методика расчета ПДСЗ “простая гантель”:

1. Задать требуемые значения частоты полюса затухания F_{\min} и частоты среза F_{cut} ;
2. Выбрать материал подложки и ее толщину;
3. Задать размер соединительной щели исходя из габаритных ограничений или же на основании ширины микрополосковой линии;
4. Используя выражения (1) и (2) рассчитать величину стороны квадрата гантели LW ;
5. Внести при необходимости правки в размеры соединительной щели при необходимости снижения размеров стороны квадрата LW ;
6. Рассчитать параметры эквивалентной цепи с помощью формул (7) и (8) для быстрой оценки характеристик фильтра, а также при отсутствии технических средств для полноценного электромагнитного моделирования структуры.

Сравнение полученной методики с методом роя частиц и эволюционной стратегии адаптации матрицы ковариации показали ускорение процесса проектирования в 2.8 и 4.37 раза соответственно.

Аналогичным образом далее была рассмотрен ПДСЗ в форме “заполненной гантели” (Рисунок 2).

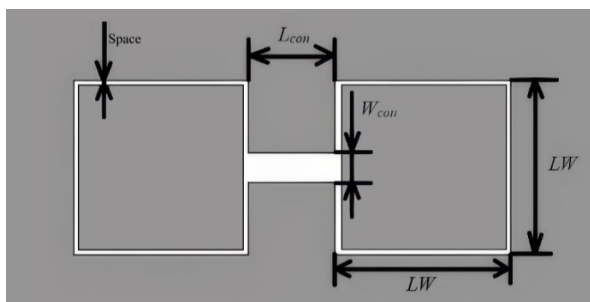


Рисунок 2 – Внешний вид ПДСЗ в виде “заполненной гантели” и его параметры

Данный ПДСЗ отличается заполнением, которое приводит к добавлению нового параметра геометрии – зазора между заполнением и стенкой квадратов ($Space$). Было проведено исследование влияния величины заполнения на характеристики структуры в сравнении с ПДСЗ “простая гантель” для определения ограничений, накладываемых на этот параметр. Было установлено, что характеристики “заполненной гантели” приближаются к “простой” при заполнении квадратов гантели по площади менее чем на 3% или же величина зазора $Space$ должна быть менее 41% от величины стороны квадрата LW .

Как и до этого, набор данных был получен с помощью моделирования структуры: LW изменялся от 4 мм до 15 мм с шагом 3 мм, L_{con} от 4 мм до 12 мм с шагом 2 мм, W_{con} от 1 мм до 4 мм с шагом 0.5 мм, T_{sub} от 1 мм до 3 мм с шагом 1 мм, E_r от 2 до 12 с шагом 2, $Space$ от 0.2 мм до 1.4 мм с шагом 0.4 мм. Эти же размеры и параметры будут являться пределами применимости и валидности дальнейшей зависимости. После проведения регрессионного анализа и подбора формы зависимости была получена следующая формула:

$$F_{\min} = 1 / (0.01649 \cdot LW + 0.00609 \cdot L_{con} - 0.0103 \cdot W_{con} + 0.008 \cdot T_{sub} + 0.008 \cdot E_r - 0.00511 \cdot Space) - 1.4 \quad (9)$$

Статистические оценки ее коэффициентов даются в Таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов и их статистические оценки для зависимости частоты затухания ПДСЗ “заполненная гантель” от ее размеров и параметров подложки.

Коэффициент	Значение	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение
a ₁	0.01649	2.6449 ⁻⁰⁵	623.43	0
a ₂	0.00609	2.4745 ⁻⁰⁵	245.97	0
a ₃	-0.01030	6.0278 ⁻⁰⁵	-170.91	0
a ₄	0.008	8.2059 ⁻⁰⁵	97.53	0
a ₅	0.00803	2.367 ⁻⁰⁵	339.32	0
a ₆	-0.00511	0.00015	-33.72	1.46 ⁻²³⁷

Данные значения статистических оценок указывают на устойчивость коэффициентов формулы и их значимость. Полученная зависимость имеет среднее квадратическое отклонение 0.0655 и коэффициент детерминации 0.975, что указывает на ее высокую точность, которая была также подтверждена диаграммой остатков и графиком распределения расстояний Кука. Следовательно, формула (9) является достаточно точной для формирования на ее основе методики расчета первого приближения ПДСЗ “заполненная гантель”, которая будет иметь следующий вид:

1. Задать требуемые значения частоты полюса затухания F_{\min} ;
2. Выбрать материал подложки и ее толщину;
3. Задать размер соединительной щели исходя из габаритных ограничений или же на основании ширины микрополосковой линии;
4. Выбрать величину зазора в относительной величине от стороны квадрата или же задать ее исходя из габаритных и производственных ограничений;
5. Используя выражение (9) рассчитать величину стороны квадрата гантели LW ;
6. Внести при необходимости правки в размеры соединительной щели или зазора при необходимости снижения размеров стороны квадрата LW ;
7. Провести моделирование полученной структуры для получения ее полноценных параметров.

Сравнение времени проектирования по предлагаемой методике с методом роя частиц и эволюционной стратегией адаптации матрицы ковариации продемонстрировало сокращение в 4.77 и 2.67 раза соответственно.

Третья глава посвящена исследованию практических приложений структур ПДСЗ: в фидерных трактах планарных антенн для их согласования и подавления побочных гармоник, а также в конструкциях делителей мощности для упрощения процесса их изготовления. В конце была предложена методика проектирования делителей мощности на основе ПДСЗ. Характеристики всех рассматриваемых конструкций были получены посредством электродинамического моделирования и верифицированы натурными измерениями макетов.

В качестве первого применения ПДСЗ было рассмотрено формирование согласующей цепи планарной патч-антенны. Для чего были исследованы две конструкции: патч-антенна без какого-либо согласования и патч-антенна с согласованием на основе ПДСЗ “простая гантель”, рассчитанного по полученной ранее

методике. В качестве материала подложки был использован диэлектрик ФАФ-4Д, толщиной 1.5 мм. Внешний вид и размеры антенн представлены на Рисунке 3 и 4.

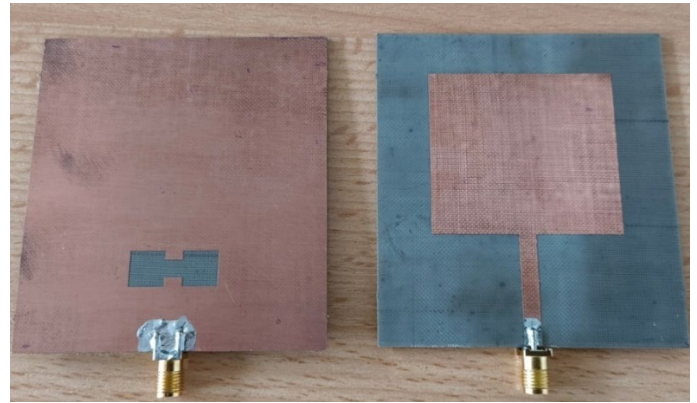
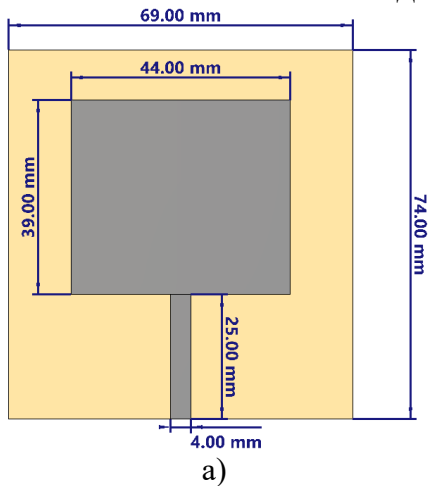


Рисунок 3 – Внешний вид и размеры антенн и макета: а) размеры патч-антенны; б) внешний вид макета

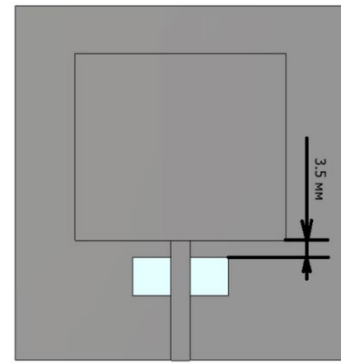
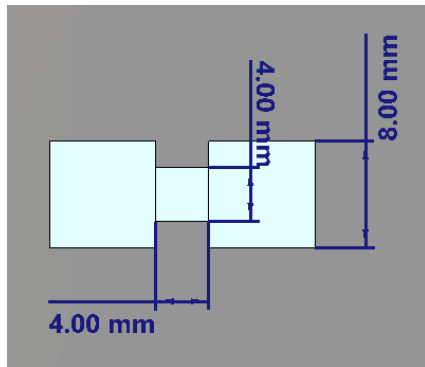


Рисунок 4 – Размеры и расположение ПДСЗ: а) размеры ПДСЗ; б) расположение ПДСЗ модифицированной антенны

Измеренные частотные зависимости возвратных потерь антенн приведены на Рисунке 5.

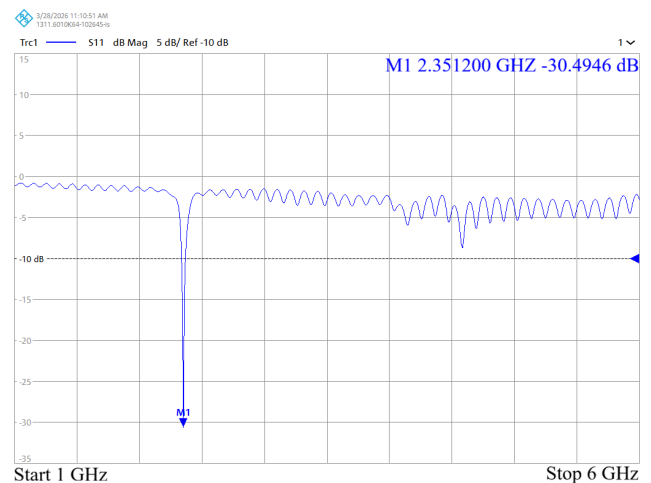
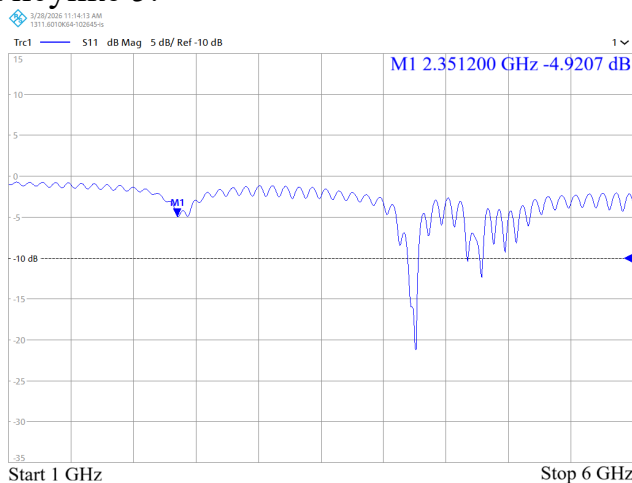


Рисунок 5 – Возвратные потери, полученные в результате измерений: а) патч-антенна без согласования; б) антенна с согласованием на основе ПДСЗ

Целевой центрально рабочей частотой антенн являлась 2.4 ГГц и по результатам видно, что при использовании согласования на основе ПДСЗ она сместилась вниз на 2.35 ГГц, но уровень возвратных потерь снизился с -4.9 дБ до -30.5 дБ. Далее следовало проверить влияние ПДСЗ на излучение антенны, для чего были измерены диаграммы направленности антенн в горизонтальной плоскости, которые приводятся на Рисунке 6.

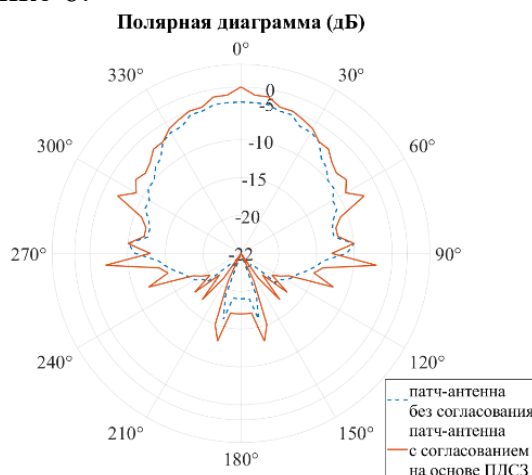


Рисунок 6 – Диаграммы направленности антенн в горизонтальной плоскости на частоте 2.35 ГГц

Как видно из представленных данных, использование ПДСЗ не внесло значительных искажений в форму диаграмм направленности, при этом коэффициент усиления антенны с ПДСЗ больше, чем у антенны без согласования, что дополнительно подтверждает эффективность такого подхода к формированию согласующих трактов.

Далее была исследована возможность применения ПДСЗ для подавления побочных гармоник антенн, что способствует увеличению помехоустойчивости, систем, где они будут применяться. Как и ранее для этого было исследовано два образца патч-антенн, идентичных по всем параметрам, кроме наличия ПДСЗ у одного из них. Материалом подложки был также выбран ФАФ-4Д толщиной 1.5 мм. Форма и размеры ПДСЗ идентичны тем, что были использованы ранее (Рисунок 4 (а)) Внешний вид конструкций представлен на Рисунке 7.

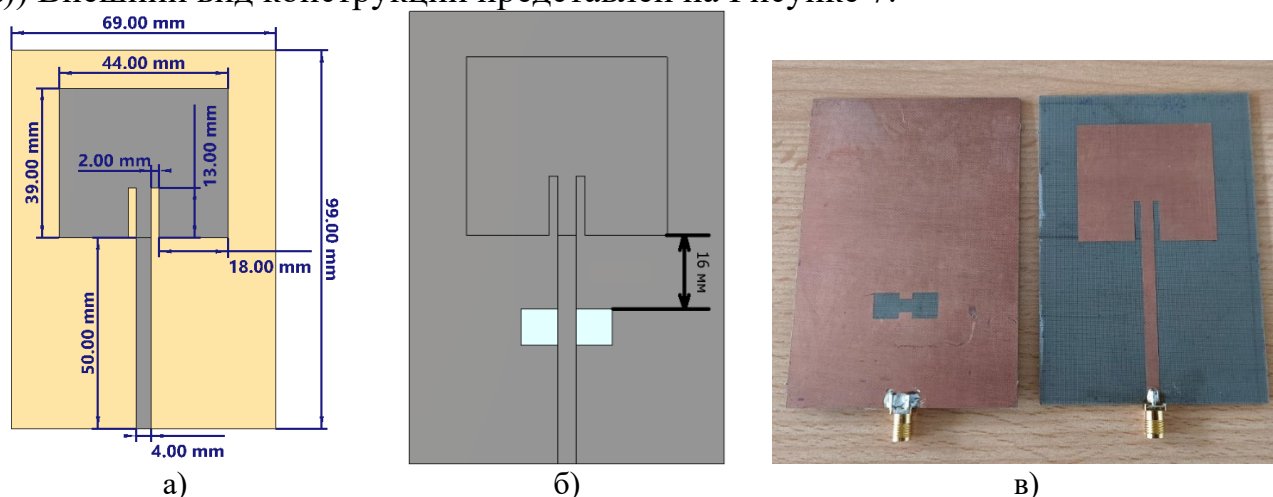


Рисунок 7 – Внешний вид и размеры: а) размеры патч-антенн; б) расположение ПДСЗ на модифицированной конструкции; в) внешний вид макетов

Графики возвратных потерь антенн представлены на Рисунке 8. Рабочей частотой обычной патч-антенны является 2.4 ГГц, а рабочая частота патч-антенны с ПДСЗ сместилась вверх на частоту 2.43 ГГц.

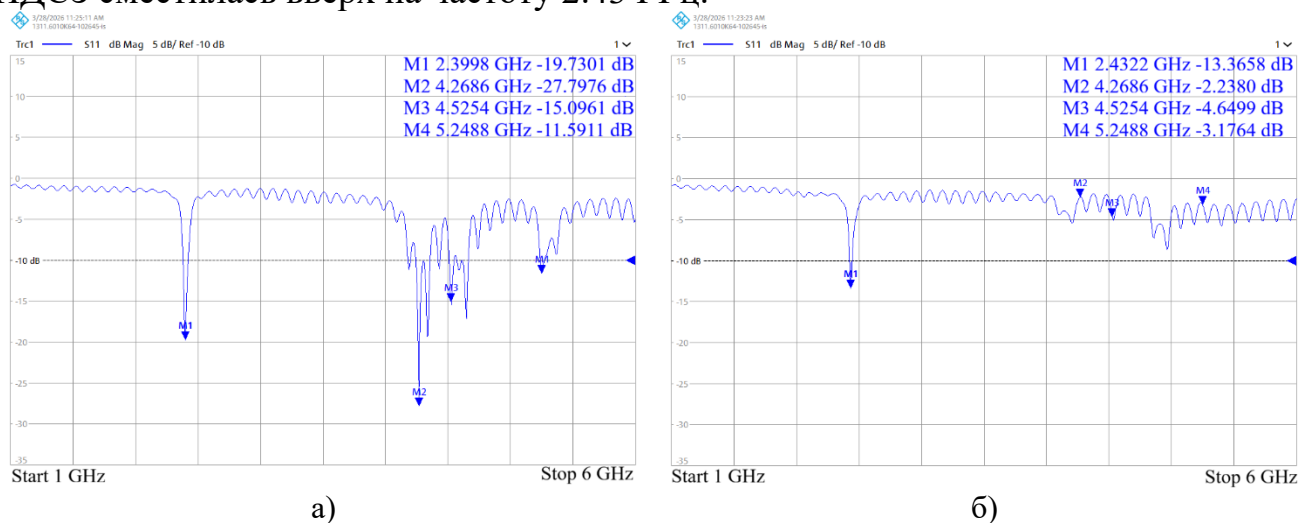


Рисунок 8 – Возвратные потери патч-антенн: а) результаты измерений антенны без ПДСЗ; б) результаты измерений антенны с ПДСЗ

По данным о возвратных потерях видно, что конструкция с ПДСЗ эффективно подавляет побочные гармоники на частотах 4.27, 4.53 и 5.25 ГГц. При этом уровень возвратных потерь на рабочей частоте конструкции с ПДСЗ выше, чем у обычной антенны на 6.36 дБ и составляет -13.37 дБ. Далее на Рисунке 9 приводятся диаграммы направленности в горизонтальной плоскости на рабочих частотах для обеих антенн.

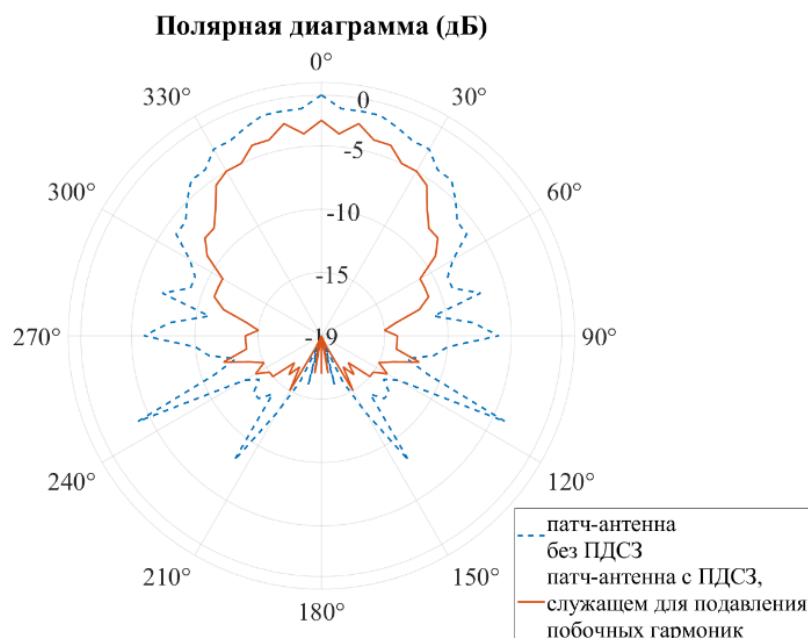


Рисунок 9 – Диаграммы направленности патч-антенн в горизонтальной плоскости на частоте 2.4 ГГц

Представленные результаты демонстрируют отсутствие искажений излучения у антенны с ПДСЗ, при этом ее коэффициент усиления оказался ниже, чем у обычной патч-антенны, что связано с разницей в уровне возвратных потерь. Все

представленные данные демонстрируют эффективность использования ПДСЗ для подавления побочных гармоник излучения антенн.

Для исследования применения частотно-избирательных свойств ПДСЗ в делителях мощности, были разработаны модификации делителя Уилкинсона, использующие структуры для замены балансного резистора, что упрощает их процесс изготовления по сравнению с классической конструкцией. Эффективность предлагаемых модификаций оценивалась относительно аналогичного делителя Уилкинсона на тот же диапазон рабочих частот. Материалом платы у всех конструкций делителя был выбран FR-4 толщиной 1 мм. Конструкция первой модификации делителя основана на ПДСЗ “простая гантель”. Ее внешний вид, размеры, а также внешний вид макета приведен на Рисунке 10.

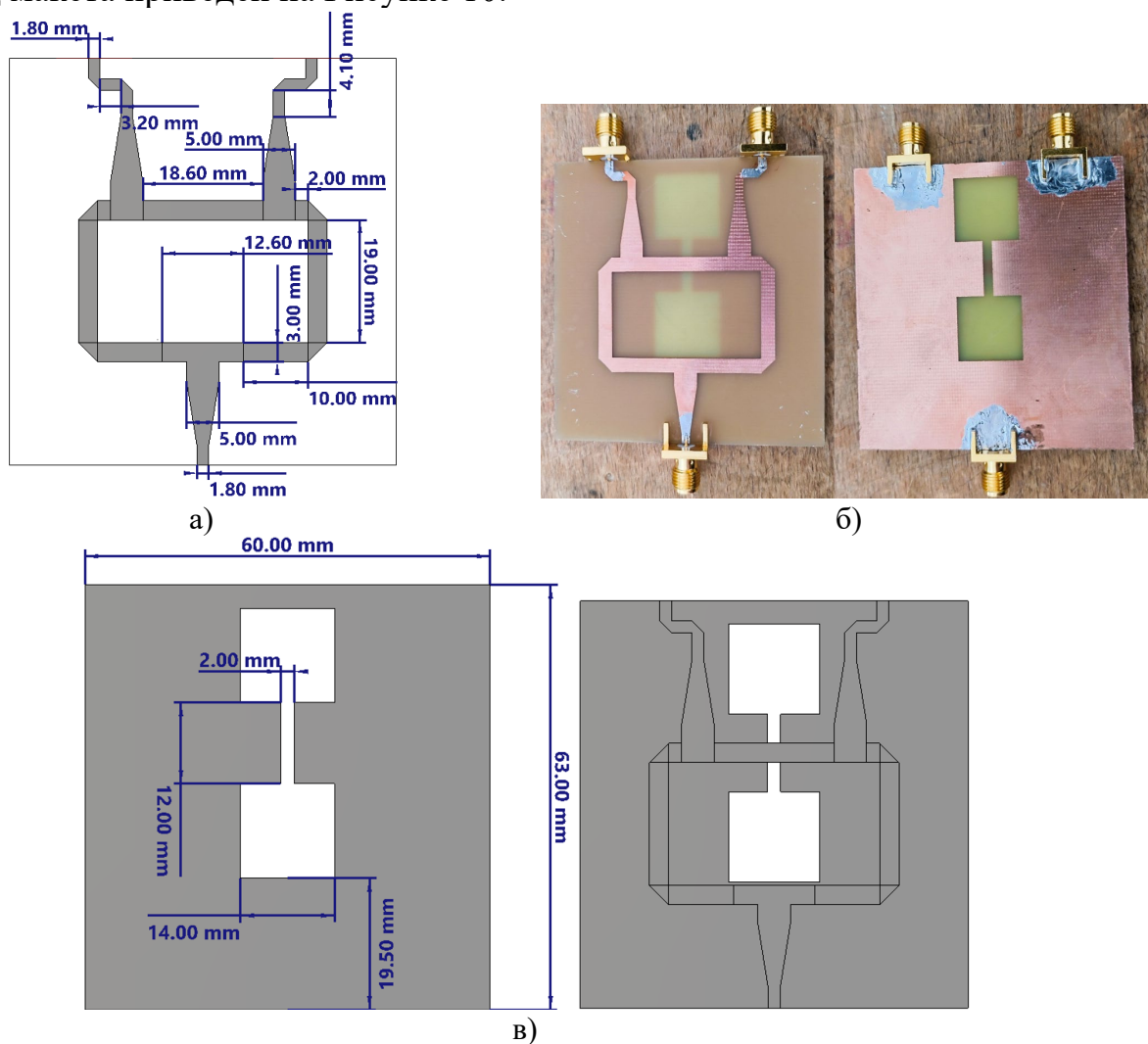


Рисунок 10 – Внешний вид и размеры конструкции делителя мощности Уилкинсона, использующей ПДСЗ “простая гантель”: а) внешний вид и размеры верхнего слоя; б) внешний вид макета; в) внешний вид и размеры нижнего слоя, а также расположение ПДСЗ

По результатам моделирования рабочие частоты делителей лежали от 5.9 ГГц до 6.5 ГГц.

Результаты моделирования показывают, что рабочие частоты делителей лежат примерно на одних частотах. Модифицированная конструкция делителя при этом показала меньший на 1.25 дБ уровень потерь при возросших возвратных

потерях на входе (с -22.85 дБ до -17.68 дБ) и выходах (с -24.93 дБ до -19.99 дБ), но изоляция между выходами выше на 4.42 дБ (с -20.04 до -24.46 дБ). Разница фаз и амплитуд при сравнении оказалась незначительной.

Затем были проведены натурные измерения макета модифицированного делителя мощности для проверки его работоспособности. Основные результаты измерений приведены на Рисунке 11.

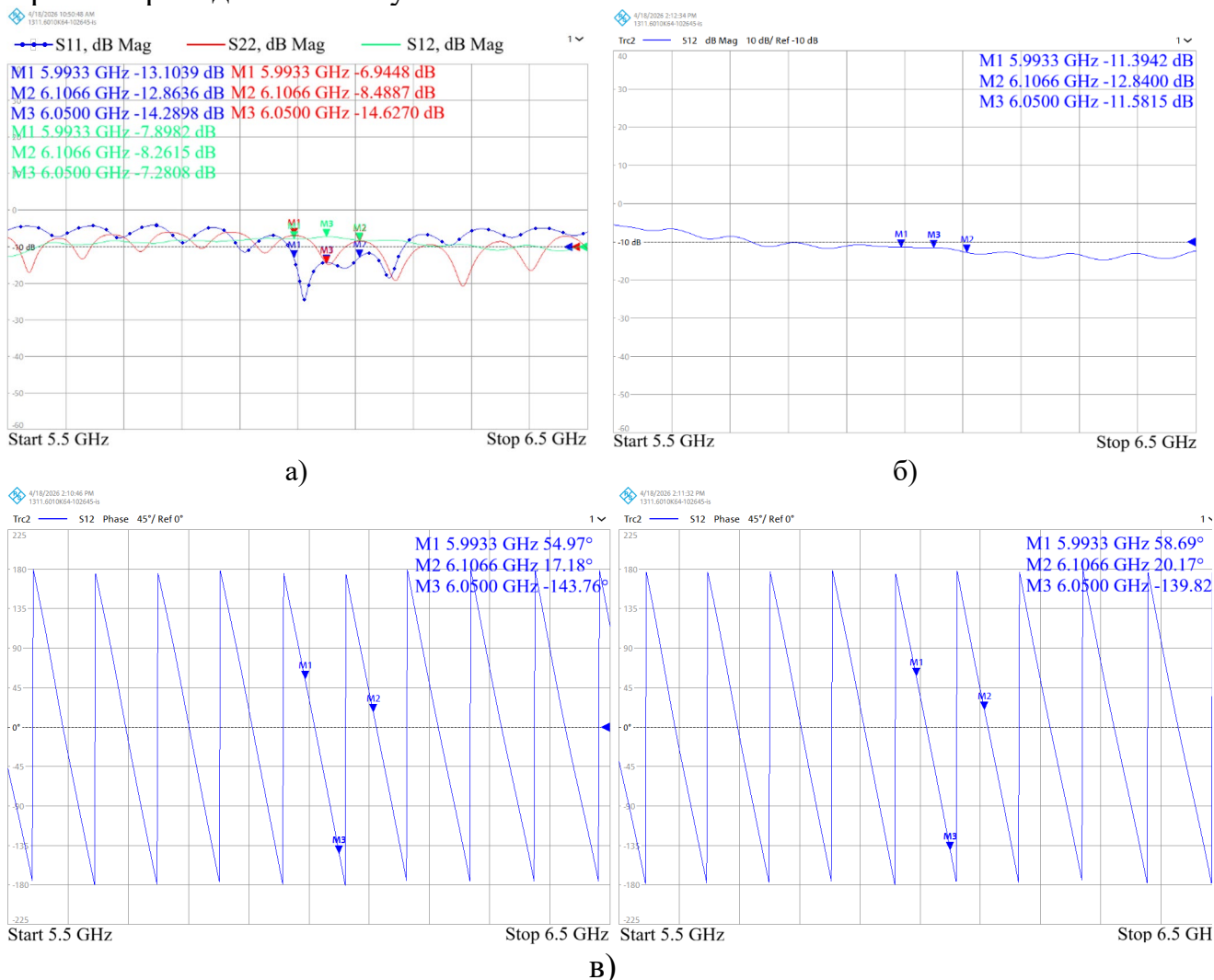


Рисунок 11 – Результаты измерений макета делителя мощности с ПДСЗ “простая гантель”: а) возвратные потери и коэффициент передачи со входа на выход; б) коэффициент передачи между выходами; в) фазы на выходах

Данные измерений показали, что макет делителя обладает более узким диапазоном рабочих частот (оказался уже примерно на 500 МГц). Также наблюдается возросший уровень потерь по сравнению с моделью (больше на 1 дБ). Коэффициент передачи между выходами делителя демонстрирует достаточную их изолированность друг от друга, так как он не поднимается выше -10 дБ на всем рабочем диапазоне. Также по фазам на выходах можно заметить возросшую фазовую ошибку, которая достигает 3.94°. Такие расхождения с результатами моделирования можно объяснить погрешностями при изготовлении и неоднородностью материала диэлектрика. Тем не менее, измерения макета подтверждают работоспособность

предложенной модификации делителя мощности, использующей ПДСЗ для изоляции выходных портов.

Также была предложена модификация делителя мощности, основанная на той же идее, но использующая ПДСЗ “заполненная гантель”. Материал подложки и ее толщина остались теми же, как и верхний слой печатной платы. Изменению подвергся слой заземления. Внешний вид структуры и макета представлены на Рисунке 12.

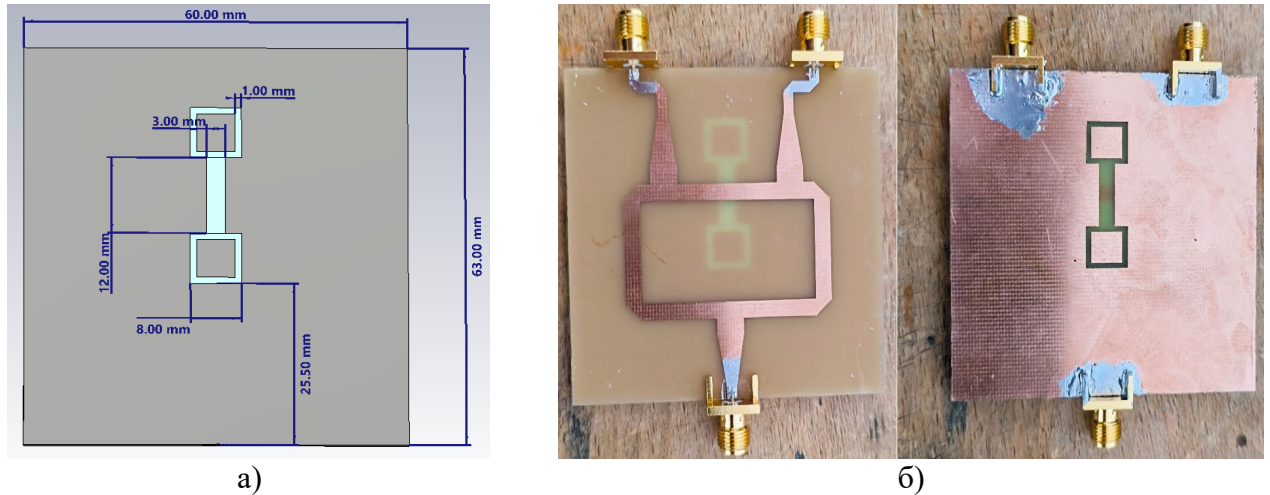
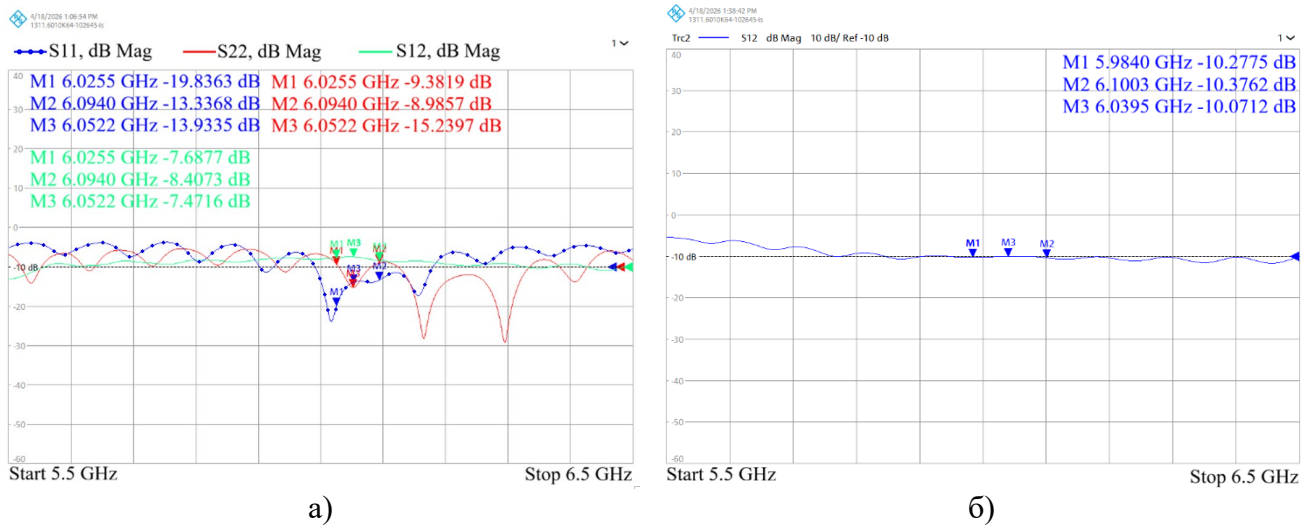


Рисунок 12 – Внешний вид конструкции делителя мощности с ПДСЗ “заполненная гантель”: а) расположение и размеры ПДСЗ; б) внешний вид макета

Результаты измерения макета модификации делителя приводятся на Рисунке 13.



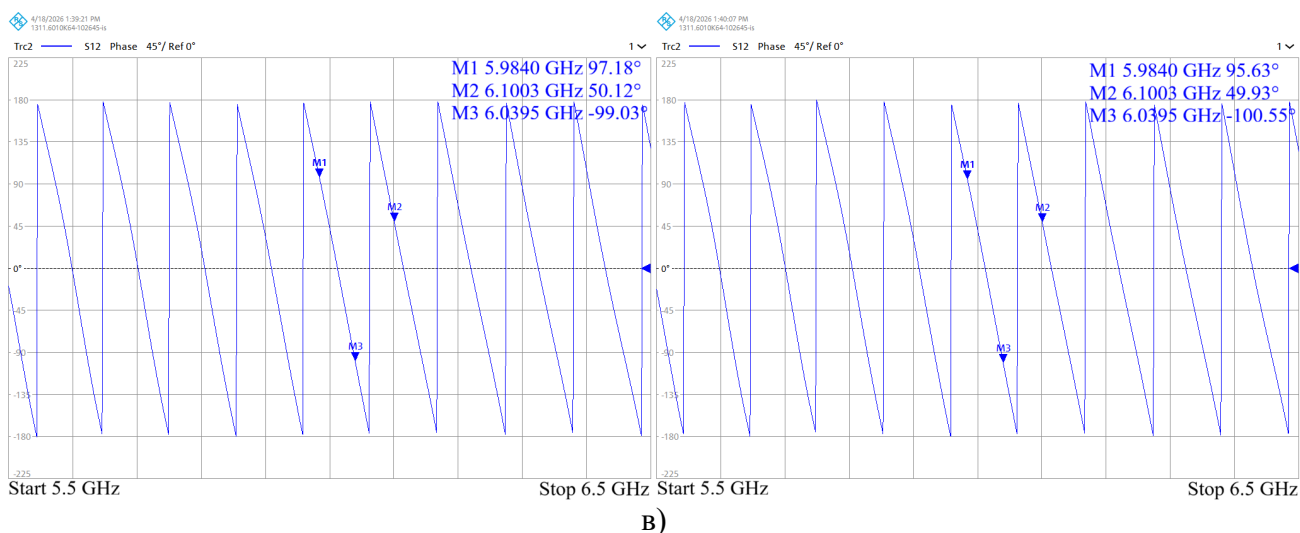


Рисунок 13 – Характеристики делителя мощности на основе ПДСЗ “заполненная гантель”: а) измеренные возвратные потери и коэффициент передачи со входа на выход; б) коэффициент передачи между выходами; в) измеренные фазы на выходах

Характеристики макета данного делителя мощности оказались хуже: диапазон рабочих частот сузился на 400 МГц; потери возросли на 1 дБ; максимальная фазовая ошибка делителя составила 1.5° . Это также объясняется погрешностями при измерениях и неточностями изготовления. Представленные результаты подтверждают работоспособность данной модификации делителя Уилкинсона и позволяют сформировать методику проектирования, основанную на использовании полученных ранее расчетных зависимостях для ПДСЗ. Предлагаемая методика упрощает процесс изготовления делителя за счет перехода к двухслойной печатной структуре и исключения пайки сосредоточенного элемента (резистора). Она будет состоять из следующих шагов:

1. Определение требований к делителю: его рабочие частоты, допустимые вносимые потери, требования к развязке выходов, допустимые фазовая и амплитудная ошибки, параметры используемой подложки.

2. Расчет базовой конструкции делителя на основании традиционных соотношений: определение волнового сопротивления линий и определение длины четвертьволновых трансформаторов.

3. Выбор типа ПДСЗ в зависимости от требований к характеристикам и габаритам конструкции.

4. Определение параметров ПДСЗ для требуемой рабочей частоты по предложенным ранее методикам и зависимостям, полученным на основании регрессионного анализа. Данные параметры ПДСЗ используются как первое приближение для конструкции делителя.

5. Размещение ПДСЗ в конструкции делителя мощности в области электромагнитной связи между выходами делителя и проведение электродинамического моделирования для оценки характеристик всей конструкции.

6. Коррекция параметров ПДСЗ для достижения требуемых характеристик делителя мощности.

В заключении формулируются основные результаты диссертационного исследования и выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках диссертационного исследования были разработаны методики моделирования и проектирования планарных антенно-фидерных устройств на основе преднамеренных дефектов слоя заземления. Предлагаемые методики основываются на явных расчетных зависимостях, связывающих характеристики ПДСЗ с их геометрическими размерами и параметрами подложки. Особенностью методик является их простота использования и минимальные требования к вычислительным мощностям по сравнению с методами электродинамического моделирования за счет простой формы полученных уравнений. Также были разработаны и исследованы конструкции антенн и делителей мощности, использующих ПДСЗ.

Основные результаты исследования могут быть сформулированы в виде следующих пунктов:

1. Получена методика расчета и проектирования ПДСЗ “простая гантель”, сокращающая время проектирования в 2.8 и 4.37 раза по сравнению с методом роя частиц и эволюционной стратегии адаптации матрицы ковариации соответственно. Для чего был проведен ее регрессионный анализ на основании 3150 точек данных, полученных с помощью параметризованного электродинамического моделирования. Полученные модели связывают частоты полюса затухания и среза с геометрией ПДСЗ и параметрами подложки и представляют собой явные расчетные зависимости. При этом модели обладают высокой точностью, что подтверждается их статистическими оценками.

2. Получена модель в форме явной расчетной зависимости для определения параметров эквивалентной цепи простой гантелеобразной структуры по ее геометрическим размерам и характеристикам подложки, отличающаяся учетом влияния конструктивных параметров ПДСЗ на параметры эквивалентной схемы и позволяющая оценить влияние отдельных параметров ПДСЗ на характер вносимого им сопротивления.

3. Получена методика расчета первого приближения ПДСЗ “заполненная гантель” на основании регрессионного анализа набора данных из 12567 точек, которые также были получены посредством электромагнитного моделирования. Полученная модель также представлена в виде явной расчетной зависимости и имеет высокую точность. Она связывает частоту полюса затухания структуры с ее размерами и параметрами подложки и сокращает время проектирования в 4.77 и 2.67 раза по сравнению с методом роя частиц и эволюционной стратегией адаптации матрицы ковариации соответственно.

4. Исследована конструкция патч-антенны с ПДСЗ, рассчитанного по полученной методике, для согласования антенн. Для этого был произведен расчет структуры “простая гантель” для патч-антенны на частоту 2.35 ГГц. При этом было произведено сравнение с антенной без согласования. Результаты измерений макетов хорошо согласуются с результатами моделирования и показали, что уровень возвратных потерь антенны с ПДСЗ уменьшился до -30.49 дБ, что ниже, чем у антенны без согласования на 25.57 дБ. Измерение диаграмм направленности антенн продемонстрировало отсутствие влияния ПДСЗ на формируемое излучение.

5. Исследована конструкция патч-антенны с ПДСЗ, рассчитанного по полученной методике, подавляющего побочные гармоники высшего порядка. Измерения макетов продемонстрировали хорошую согласуемость с моделированием и эффективное подавление гармоник на частотах 4.26 ГГц, 4.56 ГГц, 5.24 ГГц, с повышением уровня возвратных потерь с -27.8, -15.1, -11.59 до -2.23, -4.64, -3.17 дБ соответственно. Рабочая частота антенны с ПДСЗ при этом сместилась вверх с 2.38 до 2.42 ГГц. Уровень возвратных потерь на центральной частоте остался низким, но продемонстрировал рост с -19.73 дБ до -13.37 дБ. Измеренные диаграммы направленности антенн показали отсутствие влияния использования ПДСЗ в антенне на ее излучение.

6. Разработаны и исследованы модификации конструкций делителей Уилкинсона, использующих ПДСЗ для замены балансного резистора. Результаты электродинамического моделирования показали малые отличия в характеристиках по сравнению с классической конструкцией. Натурные измерения макетов делителей с ПДСЗ подтвердили работоспособность предложенных модификаций. Полученные характеристики делителей оказались хуже, чем у моделей из-за неточностей при изготовлении и неоднородностей материала диэлектрика. Получена методика проектирования предлагаемых конструкций делителей мощности на основе ПДСЗ.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации автор видит в исследовании других типов ПДСЗ и их влияния на характеристики микрополосковой линии, а также рассмотрение других возможных приложений ПДСЗ в антенно-фидерных устройствах, таких, как улучшение изоляции между элементами антенной решетки, формирование линий трансформации сопротивления, а также линий задержки. Применение предлагаемых методик позволяет значительно снизить время проектирования устройств, использующих ПДСЗ, за счет отказа от итерационного подхода или значительного снижения числа итераций подбора параметров структур, а предложенные приложения позволяют улучшить помехоустойчивость антенн и снизить стоимость производства делителей мощности.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Баранников, И. А.** Асимптотические методы анализа в электродинамике / **И. А. Баранников**, К. А. Бердников, Е. А. Ищенко, С. М. Федоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т. 17, № 5. – С. 79–84.

2. **Баранников, И. А.** Исследование возможности использования генетического алгоритма для определения амплитудно-фазового распределения антенной решетки / **И. А. Баранников**, К. А. Бердников, Е. А. Ищенко [и др.]. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.1.017. – EDN DDTBWBV // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 1. – С. 135–139.

3. **Баранников, И. А.** Алгоритмы аппроксимации электромагнитного поля и синтеза диаграмм направленности антенных решеток / **И. А. Баранников**, Ю. Г. Пастернак, В. А. Пендюрин, С. М. Федоров. – DOI 10.18127/j5604128-202401-05. – EDN LKHJIP // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 56–74.

4. **Баранников, И. А.** Реконфигурируемая патч-антенна на основе полупроводниковой плазмы / **И. А. Баранников, С. М. Федоров.** – DOI 10.36622/VSTU.2023.19.6.015. – EDN YOROJP // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19, № 6. – С. 102–106.

5. **Баранников, И. А.** Антенная решетка на основе патч-элементов с возможностью работы с двумя линейными поляризациями / **И. А. Баранников, Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак [и др.]**. – DOI 10.36622/1729-6501.2025.21.4.024. – EDN JOMPNJ // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2025. – Т. 21, № 4. – С. 162–165.

6. **Баранников, И. А.** Двухкоординатная многолучевая антенна на основе многослойной печатной линзы / **И. А. Баранников, Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак [и др.]**. – EDN QFBRGI // Теория и техника радиосвязи. – 2025. – № 1. – С. 58–63.

Работы, опубликованные в сборниках конференций и другие публикации:

7. **Баранников, И. А.** Делитель мощности на основе линзы / **И. А. Баранников, А. Е. Медведев, А. А. Силонов, С. М. Федоров.** – EDN XVJFUE // 65 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ: сборник научных трудов, Воронеж, 15 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2025. – С. 28–32.

8. **Баранников, И. А.** Многослойная линза для построения многолучевых антенн с возможностью сканирования по двум координатам / **И. А. Баранников, Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак [и др.]**. – EDN JZWJDW // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 02–04 декабря 2024 года. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2025. – С. 421–425.

9. **Баранников, И. А.** Компактная апертурная многолучевая антенна / **И. А. Баранников, Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак [и др.]**. – EDN HSEFYC // Шарыгинские чтения: Международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации. – 2024. – Т. 1, № 1. – С. 160–165.

10. **Баранников, И. А.** Линза полусферической формы из метаматериала для построения двух поляризационных многолучевых антенн / **И. А. Баранников, Е. А. Ищенко, Ю. Г. Пастернак [и др.]**. – EDN XMSVLO // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 02–04 декабря 2024 года. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2025. – С. 410–414.

11. **Баранников, И. А.** Делитель мощности на основе использования преднамеренных дефектов слоя земли печатной платы / **И. А. Баранников, Е. А. Ищенко, С. М. Федоров.** – EDN BHLIQO // 65 научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов ВГТУ: сборник научных трудов, Воронеж, 15 апреля 2025 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2025. – С. 33–36.

12. **Баранников, И. А.** Делитель мощности на основе структуры преднамеренного дефекта слоя заземления / **И. А. Баранников**, А. В. Володько, Н. А. Перов. // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXXII Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах, Воронеж, 21–23 апреля 2026 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2026. – С. 172–177.

Патенты РФ:

13. Программа интерактивной визуализации и параметрического анализа контуров диаграммообразующих устройств: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024687015: № 2024686624: заявл. 08.11.2024: опубл. 13.11.2024 / С. М. Федоров, **И. А. Баранников**, Е. А. Ищенко, Е. Д. Егорова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет». – EDN GCZPKZ.

Подписано в печать 25.06.2026

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л.: 1,25. Тираж 85 экз. Заказ № 110.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84