

На правах рукописи



Иванов Антон Андреевич

**Методы, программы и устройство
для оценки эффективности экранирования
типовых экранирующих конструкций
радиоэлектронных средств**

Специальность 2.2.13 – Радиотехника,
в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: **Комнатнов Максим Евгеньевич**,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, ФГБОУ ВО «ТУСУР»

Официальные оппоненты: **Гизатуллин Зиннур Марселевич**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ »

Дунаевский Григорий Ефимович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
технический университет»

Защита состоится 21 декабря 2021 г. в 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться на в библиотеке или на официальном сайте ТУСУРа: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/3q9chivd>.

Автореферат разослан «__» ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Электромагнитное экранирование является одним из основных способов защиты радиоэлектронных средств (РЭС) от воздействия излучаемых электромагнитных помех. Как правило, проектирование электромагнитного экрана РЭС сводится к поиску его оптимальной конструкции, при которой в заданном частотном диапазоне достигается наилучшая эффективность экранирования (ЭЭ). Этот процесс требует многократной оценки ЭЭ, что вызывает рост временных и вычислительных затрат на проектирование электромагнитного экрана, а значит и самого РЭС. Таким образом, для снижения затрат на проектирование РЭС актуально совершенствование методов и программ для моделирования экранирующих конструкций (ЭК). На поздних этапах проектирования ЭК РЭС обычно требуется проведение измерений её ЭЭ. Зачастую для этого используются две антенны (приемная и передающая), одна из которых размещается внутри ЭК. Для ЭК, имеющих небольшие габариты или внутреннее заполнение, проведение подобных измерений затруднительно. Поэтому, актуальна разработка методов и устройств, позволяющих выполнить косвенные измерения ЭЭ без необходимости внесения антенны внутрь ЭК.

Состояние исследований. Исследованию ЭК посвящено большое число работ в ведущих зарубежных журналах, материалах научных конференций и симпозиумов по электромагнитной совместимости РЭС. Вопросы моделирования и измерений ЭЭ рассматриваются во множестве инженерных пособий и книг, наиболее известными авторами которых являются R. Araneo, S. Celozzi, H.W. Ott, Л.Н. Кечиев, Д.Н. Шапиро и др. Основной вклад в исследование ЭК, заполненных структурами из проводников, диэлектриков и радиопоглощающих материалов (РПМ), внесли зарубежные исследователи J.F. Dawson, I.D. Flintoft, Y. Liu, A.C. Marvin, D.W.P. Thomas и др. В большинстве работ, опубликованных в этой области, для определения ЭЭ используются численные методы, поскольку аналитические методы, более подходящие для ранних этапов проектирования ЭК, развиты в недостаточной степени. В основном, существующие аналитические методы, предложенные P. Dehkoda, T. Konefal, M.P. Robinson, D. Shi, M.C. Yin и др., предназначены для оценки ЭЭ пустых ЭК с различными количеством, формой и геометрическими размерами апертур. При этом, для некоторых типовых структур, таких как апертура с диэлектрическим заполнением или массив апертур с произвольным расположением на стенке ЭК, аналитические методы пока не разработаны. В последние годы, металлы и сплавы, традиционно используемые для изготовления ЭК, заменяются на полимерные композитные экранирующие материалы, обладающие значительно меньшим весом, но менее высокой ЭЭ и недостаточной физической прочностью. Одним из возможных вариантов преодоления этих недостатков является создание многослойных электромагнитных экранов на основе различных сочетаний полимерных композитов. Такие конструкции исследовали B. Gaoui, D. Han, M. Tahar, В.И. Суслев и др., однако простые аналитические методы для оценки

ЭЭ многослойных полимерных экранов, пригодные для использования разработчиками РЭС, пока не разработаны. Моделирование ЭК обычно выполняется в коммерческом программном обеспечении (ПО) на основе численных методов. Однако из-за высокой стоимости такое ПО недоступно широкому кругу разработчиков РЭС. Большая часть бесплатного ПО основана на аналитических методах и предназначена только для моделирования экранирующих материалов. При этом, несмотря на значительный вклад L. Sevgi, Ю.Н. Кофанова, А.С. Шалумова и др., универсальное ПО для моделирования ЭК на основе аналитических методов не разработано. В большинстве опубликованных исследований традиционные методы измерений по стандартам IEEE STD 299 и MIL-STD-285 применяются для определения ЭЭ средне- и крупногабаритных ЭК, не имеющих внутреннего заполнения. Для ЭК, имеющих небольшие геометрические размеры или заполнение, могут быть применены методы косвенного измерения ЭЭ из работ M. Joodaki, M. Kuhn, A. Shourvarzi и др., не требующие размещения антенны внутри ЭК. Однако устройство и оснастка для проведения подобных измерений еще не разработаны.

Цель работы – разработать методы, программы и устройство для оценки ЭЭ ЭК РЭС. Для её достижения требуется решить следующие **задачи**: выполнить обзор известных устройств и методов оценки ЭЭ ЭК, а также материалов, применяющихся для их изготовления; разработать методы моделирования ЭЭ типовых ЭК, заполненных структурами из проводников, диэлектриков и РМП; усовершенствовать методы для моделирования апертур в типовых ЭК; разработать метод для приближенной оценки ЭЭ многослойных экранов на основе полимерных композитных экранирующих материалов; создать алгоритмы и прототип ПО для моделирования типовых ЭК; разработать измерительную оснастку и лабораторный макет устройства для косвенных измерений ЭЭ ЭК.

Научная новизна

1. Предложены усовершенствованные методы моделирования ЭЭ, отличающиеся учетом заполнения ЭК проводящими пластинами и структурами из диэлектриков и РПМ.

2. Предложена модификация аналитического метода расчета ЭЭ многослойного экрана, отличающаяся способом вычисления волнового сопротивления его материалов.

3. Разработано устройство для испытания ЭК на ЭЭ, отличающееся использованием измерительной оснастки на основе микрополосковых линий или камеры поперечной электромагнитной волны, применимостью к цилиндрическим экранам и возможностью трехмерной визуализации результатов измерений.

Теоретическая значимость

1. Изложены теоретические основы усовершенствованных методов моделирования ЭЭ, предназначенных для ЭК, заполненных проводящими пластинами, а также структурами из диэлектриков и РПМ.

2. Произведена модернизация аналитических методов моделирования прямоугольной апертуры и массива круглых апертур при их произвольном расположении на стенке ЭК.

3. Применительно к анализу ЭЭ многослойных электромагнитных экранов из полимерных композитных материалов результативно использованы разработанный аналитический метод и экспериментальная методика измерений с применением коаксиальной камеры.

4. Изучены частотные зависимости ЭЭ металлических ЭК РЭС при расположении в них проводящих пластин, а также структур из диэлектриков и РПМ.

Практическая значимость

1. Аналитические методы, основанные на них алгоритмы и ПО разработаны и внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ТУСУР», а также в АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнёва в рамках создания ЭК элементов силовой шины электропитания космического аппарата и устройств, входящих в состав аппаратно-программного комплекса для её испытаний (2 акта внедрения).

2. Алгоритм для моделирования ЭК РЭС на основе метода матрицы линий передачи разработан и внедрен в ООО «НПК «ТЕСАРТ» в рамках создания программы для моделирования антенных элементов (акт внедрения).

3. Определены частотные зависимости ЭЭ многослойных экранов, выполненных на основе полимерных композитных материалов с наполнителями из частиц меди и углерода, в рамках выполнения работ по хоздоговору с ООО «ТехЭкра».

4. Созданы система практических рекомендаций по применению аналитических методов при проектировании электромагнитных экранов, а также методика оптимизации многоуровневых ЭК РЭС.

5. Создан лабораторный макет устройства для косвенных измерений ЭЭ металлических ЭК и определены преимущества и недостатки предложенных вариантов измерительной оснастки устройства.

Методология и методы исследования. В работе применены теория линий передачи, теория цепей, аналитические методы и выражения, электродинамическое моделирование на основе численных методов матрицы линий передачи, конечных элементов и конечных разностей во временной области, параметрическая оптимизация эвристическим поиском и методом доверительных интервалов, квазистатический анализ с применением методов моментов и конечных элементов, а также натурные эксперименты с использованием векторных и скалярных анализаторов цепей, безэховой и коаксиальной камер, штыревой и дипольной антенн.

Положения, выносимые на защиту

1. Эффективность экранирования прямоугольного корпуса, заполненного проводящими пластинами, диэлектрическими или радиопоглощающими материалами, может быть вычислена аналитическими методами: для стандартизированного корпуса среднее значение абсолютной погрешности результатов не превышает 5,7 дБ в диапазоне частот до 1 ГГц.

2. Предложенный аналитический метод позволяет выполнять оценку эффективности экранирования многослойных экранов из полимерных композитных материалов.

3. Разработанный лабораторный макет устройства для испытания цилиндрических и прямоугольных экранирующих конструкций позволяет без размещения внутри них рецептора электромагнитного излучения измерять эффективность экранирования до частоты 1 ГГц с трехмерной визуализацией результатов измерений.

Результаты работы соответствуют паспорту специальности «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения» в рамках областей исследований: 8. Создание теории синтеза и анализа, а также методов моделирования радиоэлектронных устройств; 2. Исследование явлений прохождения электромагнитных волн различных диапазонов через среды, их рассеяния и отражения; 9. Разработка научных и технических основ проектирования, конструирования, технологии производства, испытания и сертификации радиотехнических устройств.

Достоверность результатов подтверждена корректным использованием теории линий передачи и теории цепей, а также согласованностью результатов измерений и моделирования численными и аналитическими методами. Реализуемость предложенного устройства с оснасткой подтверждена моделированием и экспериментально.

Использование результатов исследований

1. ПНИ «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов», проект ФЦП RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.

2. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов», государственное задание № 8.9562.2017/БЧ, 2017–2019 гг.

3. НИР «Исследование эффективности экранирования композитных материалов для их применения в составе экранирующих конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры современных космических аппаратов», грант РФФИ № 18-38-00619, 2018–2020 гг.

4. НИР «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров», грант РФФИ № 19-79-10162, 2019–2022 гг.

5. НИР «Разработка портативного анализатора на основе измерителя S-параметров для оценки экранирующих свойств малогабаритных компонентов радиоэлектронных средств» в рамках программы «УМНИК» Фонда содействия инновациям (ФСИ), грант № 14878ГУ/2019, 2019–2022 гг.

6. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости», государственное задание FEWM-2020-0041, 2020–2023 гг.

7. НИР «Измерение частотной зависимости эффективности электромагнитного экранирования полимерных композитов» в рамках хоздоговора № 50/20 от 19.10.2020 между ТУСУР и ООО «ТехЭкра», 2020 г.

8. НИР «Измерение эффективности электромагнитного экранирования слоистых композитных образцов с волнообразной поверхностью» в рамках хоздоговора № 3/21 от 10.02.2021 между ТУСУР и ООО «ТехЭкра», 2021 г.

9. НИР «Разработка математического обеспечения и программного модуля для моделирования радиотехнических характеристик антенного элемента», договор № ДП2021-60 от 15.04.2021 г.

Апробация результатов. Результаты работы позволили победить в конкурсах: грантов РНФ (проект № 19-79-10162, 2019–2022 гг.) и ФСИ (грант «УМНИК» № 14878ГУ/2019, 2019–2022 гг.), на назначение стипендии Правительства РФ (2021 г.), на включение в состав кадрового резерва ТУСУРа (2019 г.); на лучшую ВКР ТУСУРа в категории магистерских диссертаций по техническим направлениям подготовки (2020 г.). Результаты представлялись в материалах конференций: «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2016, 2018, 2019 и 2020 гг.; «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2018 и 2020 гг.; «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2019 и 2020 гг.; «Молодежь и современные информационные технологии», г. Томск, 2020 г.; «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», г. Томск, 2020 г.; «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем», г. Москва, 2020 г.; International conference of young professionals in electron devices and materials, Эрлагол, 2020 и 2021 гг.

Публикации. Результаты опубликованы в 27 работах (5 без соавторов):

Тип публикации	Количество
Статья в изданиях из перечня ВАК	4
Статья в журнале, индексируемом Scopus (Q1)	1
Статья в изданиях, индексируемых Web of Science/Scopus	5
Доклад в трудах международных конференций	10
Доклад в трудах региональных конференций	1
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	4
Патент на изобретение	2

Личный вклад. Все результаты работы получены автором лично или при его непосредственном участии. Основной вклад автора заключается в разработке методов и алгоритмов для математического моделирования ЭК. Устройство для косвенных измерений разработано автором совместно с Комнатовым М.Е. Измерения ЭЭ и часть электродинамического моделирования выполнены совместно с Демаковым А.В. ПО разработано совместно с Квасниковым А.А. и Онищенко И.А. Часть результатов получена при участии соавторов публикаций.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 227 наименований и 2 приложения. Объем диссертации с приложениями – 182 с., в т.ч. 148 рисунков и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 Обзор устройств и методов оценки эффективности экранирования типовых экранирующих конструкций и материалов

В подразделе 1.1 рассмотрены основные особенности проектирования ЭК РЭС, современные экранирующие материалы, а также основные факторы, влияющие на ЭЭ типовых ЭК. В подразделе 1.2 описаны устройства и методы измерения ЭЭ. В подразделе 1.3 рассмотрены основные численные и аналитические методы, применяемые для оценки ЭЭ ЭК и материалов. В подразделе 1.4 приведено краткое описание существующего ПО для оценки ЭЭ. В подразделе 1.5 сформулированы цель и задачи работы.

2 Разработка аналитических методов для оценки эффективности экранирования типовых экранирующих конструкций радиоэлектронных средств

В подразделе 2.1 разработаны аналитические методы для оценки ЭЭ корпуса, заполненного диэлектриками, РПМ или проводящими пластинами, при воздействии на него плоской электромагнитной волны (ПЭМВ). Для вычисления ЭЭ составляется эквивалентная схема, в которой ПЭМВ заменяется источником напряжения V_0 с внутренним сопротивлением $Z_0 = 120\pi$ Ом, стенка корпуса с апертурой – импедансом Z_{ap} , а оставшаяся часть корпуса – короткозамкнутым волноводом. Выполняются преобразования эквивалентной схемы с помощью теоремы Тевенина и выражений для расчета входного импеданса и напряжения в линии передачи (ЛП). ЭЭ определяется из тока или напряжения в преобразованной схеме.

Для оценки ЭЭ прямоугольного корпуса, заполненного диэлектриками или РПМ, предложено заменить корпус набором отрезков волноводов, имеющих одинаковые размеры, но различающиеся электрофизические параметры заполнения, а при преобразовании эквивалентной схемы для вычисления характеристического импеданса Z_g и постоянной распространения k_g в каждом регулярном отрезке волновода использовать выражения (1)–(2), в которых λ –

$$Z_g = \frac{Z_0 \sqrt{\mu_r / \epsilon_r}}{\sqrt{1 - \left[\lambda / (2a \sqrt{\epsilon_r \mu_r}) \right]^2}} \quad (1)$$

$$k_g = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \right)^2} \quad (2)$$

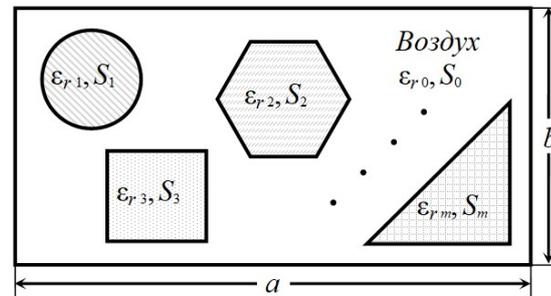


Рисунок 2.1 – Регулярная часть корпуса с набором из m диэлектриков

$$\epsilon_{eff} = \left[\sum_0^m S_m / (ab \sqrt{\epsilon_{r_m}}) \right]^{-2} \quad (3)$$

частота воздействующей ПЭМВ, a – ширина корпуса, ϵ_r и μ_r – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости заполняющего материала.

В случае, когда корпус заполнен набором из m диэлектриков произвольной формы (рисунок 2.1), предложено вместо ϵ_r в (1)–(2) подставлять выражение (3), в котором b – высота корпуса, S_m – площадь m -го диэлектрика в поперечном сечении рассматриваемой части корпуса.

С помощью разработанных методов и

метода конечных элементов (МКЭ), в диапазоне частот от 1 МГц до 1 ГГц вычислена ЭЭ прямоугольного корпуса $300 \times 120 \times 300 \text{ мм}^3$ из стандарта IEEE STD 1597.2 при его заполнении различными структурами из диэлектриков и РПМ. Показано, что среднее значение абсолютной погрешности Δ результатов вычислений не превышает 4,5 дБ. На рисунке 2.2 приведен пример вычисления ЭЭ с использованием (1)–(3) в центре вышеописанного корпуса с двумя прямоугольными диэлектрическими структурами высотой 30 мм с $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = 5$.

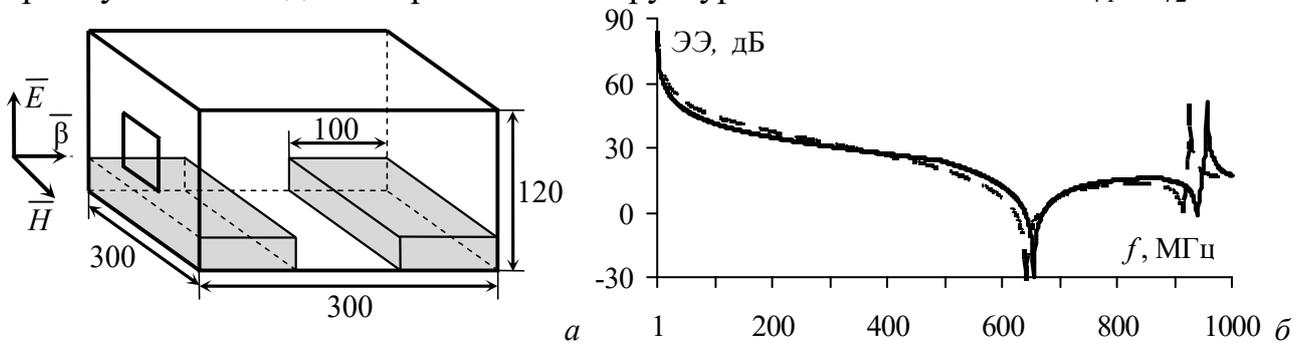


Рисунок 2.2 – Корпус с двумя диэлектрическими структурами (а) и частотные зависимости его ЭЭ, вычисленные МКЭ (---) и предложенным методом (—) (б)

Разработан аналитический метод для оценки ЭЭ корпуса, заполненного проводящими пластинами. Пластина рассматривается как ёмкостная диафрагма, заполняющая всю ширину корпуса. В эквивалентной схеме пластина заменяется импедансом $Z_{cp} = jB^{-1}$, где B – реактивная часть проводимости ёмкостной диафрагмы, которая может быть вычислена по известным аналитическим выражениям. На рисунке 2.3 приведено сравнение частотных зависимостей ЭЭ

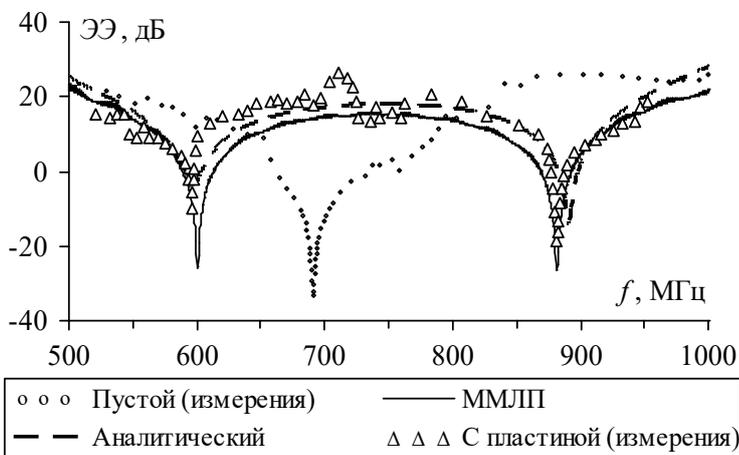


Рисунок 2.3 – Частотные зависимости ЭЭ корпуса с проводящей пластиной и без неё

для корпуса $300 \times 120 \times 300 \text{ мм}^3$ с пластиной высотой 100 мм, установленной на расстоянии 75 мм от стенки корпуса с апертурой, вычисленных предложенным методом, численным методом матрицы линий передачи (ММЛП) и измеренных в безэховой камере. Видно, что при установке пластины в корпус его ЭЭ сильно изменяется:

вместо одной резонансной частоты наблюдаются две (600 МГц и 880 МГц). Для предложенного метода значения Δ составили 5,6 дБ и 3,9 дБ относительно результатов измерений и моделирования по ММЛП, соответственно.

В подразделе 2.2 предложены методы моделирования апертур в типовых ЭК РЭС. Разработан метод расчета импеданса Z_{ap} для стенки корпуса с произвольно расположенной апертурой, позволяющий в 77 раз быстрее рассчитать частотную зависимость ЭЭ по сравнению с уже существующим методом, требующим численного интегрирования. Предложен метод расчета

Z_{ap} для ЭК с массивом апертур (перфорацией), отличающийся учетом произвольного расположения перфорации на стенке ЭК. Разработан полуаналитический метод расчета Z_{ap} для ЭК с апертурой, заполненной диэлектрическим, магнитным или магнитодиэлектрическим материалом. Стенка корпуса заменяется двумя короткозамкнутыми отрезками копланарной полосковой линии (КПЛ), при этом Z_{ap} определяется из входных сопротивлений этих отрезков с помощью (4), где l – ширина апертуры, а C и C' – погонные ёмкости КПЛ, $Z_{ap} = j \frac{1}{2} \frac{l}{a} \frac{1}{c \sqrt{C'C}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi l}{\lambda} \sqrt{\frac{C}{C'}} \right)$ (4) определяющиеся с помощью квазистатического моделирования, причем значение C вычисляется при заполнении КПЛ материалом с $\epsilon_r \geq 1$, а C' – с $\epsilon_r = 1/\mu_r$ в соответствии с электростатической аналогией расчета индуктивности. Выполнены вычисления (предложенным методом и ММЛП) и измерения (в безэховой камере) ЭЭ корпуса $300 \times 120 \times 300$ мм³ со щелью 4×190 мм² при её заполнении диэлектриком с $\epsilon_r \approx 3,3$ (рисунки 2.4а–в). Полученные частотные зависимости ЭЭ приведены на рисунке 2.4г (там же представлена измеренная ЭЭ для корпуса с пустой щелью). Для разработанного метода значения Δ составили 2,1 дБ и 5,7 дБ относительно результатов вычисления по ММЛП и измерений, соответственно.

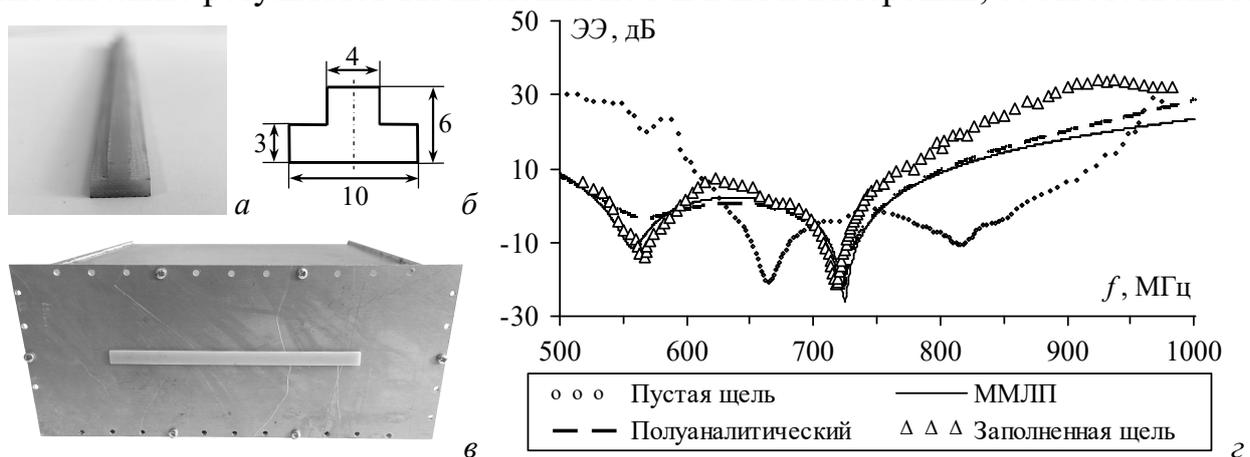


Рисунок 2.4 – Внешний вид (а) и размеры (б) диэлектрика; макет корпуса с заполненной щелью (в); частотные зависимости ЭЭ корпуса с пустой и заполненной щелью (г)

В подразделе 2.3 предложен аналитический метод для оценки ЭЭ, отличающийся применимостью к многослойным экранам из полимерных композитных материалов (ПКМ). Многослойный экран заменяется эквивалентной схемой из каскадно-соединенных четырехполосников, а ЭЭ рассчитывается из коэффициента передачи K в схеме. Значение K определяется из матрицы A -параметров, элементы которой вычисляются на основе волнового сопротивления Z в слоях экрана. Для экранов из ПКМ при вычислении Z предложено использовать выражение (5), в котором μ_0 – магнитная постоянная, а σ – удельная электрическая проводимость слоя экрана, которая вычисляется из мнимой части ϵ_r . Сравнение результатов моделирования ЭЭ предложенным методом и численным методом конечных разностей во временной области (МКРВО) показывает, что Δ не превышает 0,6 дБ (рисунок 2.5).

$$Z = (1 + j) \sqrt{\frac{2\pi c}{\lambda} \frac{\mu_0 \mu_r}{\sigma}} \quad (5)$$

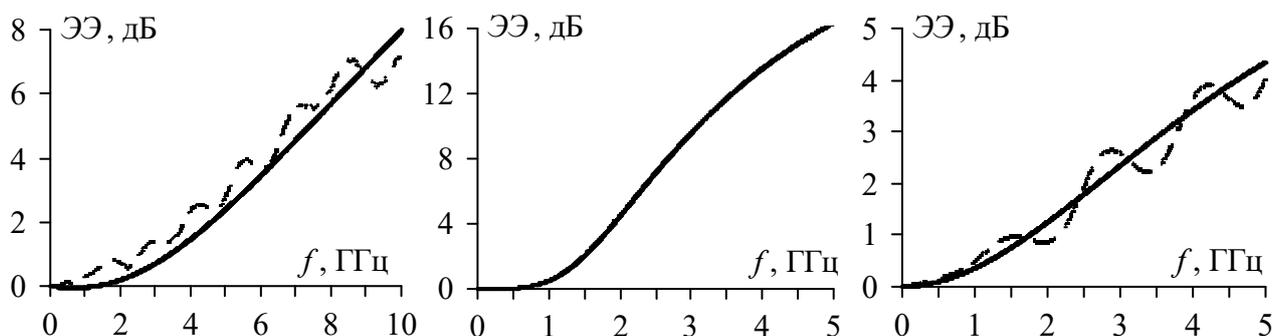


Рисунок 2.5 – Частотные зависимости ЭЭ трех разных экранов из ПКМ, вычисленные по МКРВО (---) и аналитическим методом (—)

С помощью моделирования предложенным методом и измерений в коаксиальной камере получены частотные зависимости ЭЭ многослойных экранов из ПКМ толщиной 1 мм и 3 мм, выполненных из полипропилена с наполнителями из частиц меди (М) и углерода (У). Рассматривались 4 конструкции экрана: 1) М-3 мм – У-1 мм – У-3 мм – М-1 мм, 2) У-1 мм – М-3 мм – У-3 мм – М-1 мм; 3) У-3 мм – М-3 мм – М-1 мм – У-1 мм; 4) У-3 мм – М-3 мм – У-1 мм – М-1 мм. Полученная ЭЭ представлена на рисунке 2.6 (результаты измерений сглажены полиномом третьей степени). Видно, что в обоих случаях наилучшей ЭЭ обладает экран 2 (на частоте 12 ГГц ЭЭ достигает 13 дБ при моделировании и 14,5 дБ при измерениях), а худшей – экран 4 (не более 4,1 дБ).

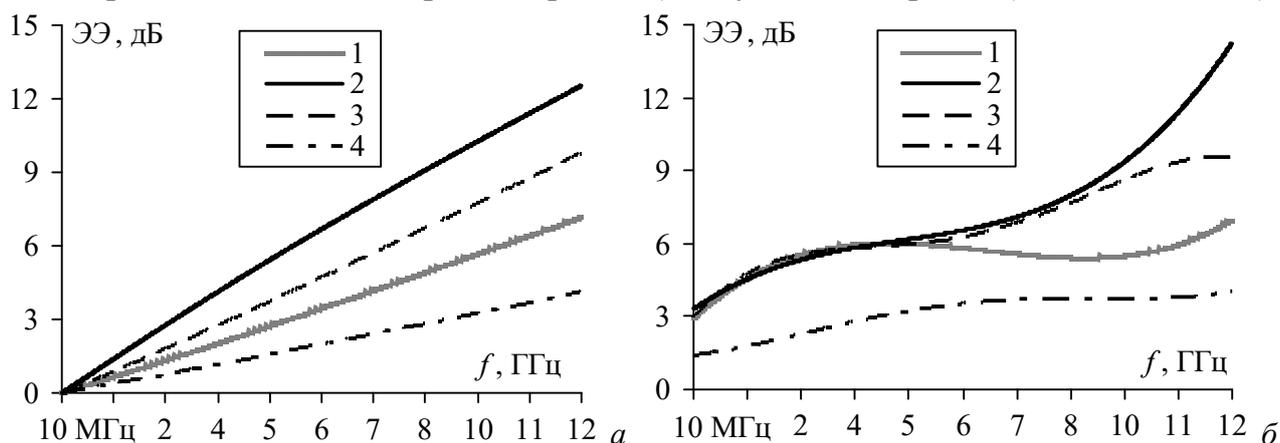


Рисунок 2.6 – Частотные зависимости ЭЭ многослойных экранов, полученные предложенным методом (а) и с помощью измерений в коаксиальной камере (б)

3 Разработка вычислительных алгоритмов и программ для моделирования экранирующих конструкций радиоэлектронных средств

В подразделе 3.1 выполнена программная реализация и сравнение аналитических методов оценки ЭЭ ЭК, описанных в разделе 1. Выявлены методы, позволяющие наиболее точно оценить ЭЭ типовых ЭК с одной прямоугольной или круглой апертурой, со щелью, с группой или массивом апертур. На основе выполненного сравнения разработан алгоритм моделирования ЭЭ произвольной ЭК, включающий аналитические методы из разделов 1 и 2. Создан прототип ПО для моделирования типовых ЭК РЭС (рисунок 3.1а). С помощью этого ПО разработаны ЭК для помехозащитного фильтра силовой шины электропитания (СШЭП) космического аппарата,

эквивалента сети (LISN) для испытаний СШЭП и блока питания и управления климатической экранированной камеры.

В подразделе 3.2 на основе аналитических методов из разделов 1 и 2 разработан прототип ПО для моделирования экранирующих материалов или плоских электромагнитных экранов. К отличительным чертам разработанного ПО относятся собственная библиотека экранирующих материалов, а также возможность трехмерного отображения зависимости ЭЭ от частоты и расстояния между источником воздействия и экраном (рисунок 3.1б), доступная при моделировании ЭЭ в ближней зоне.

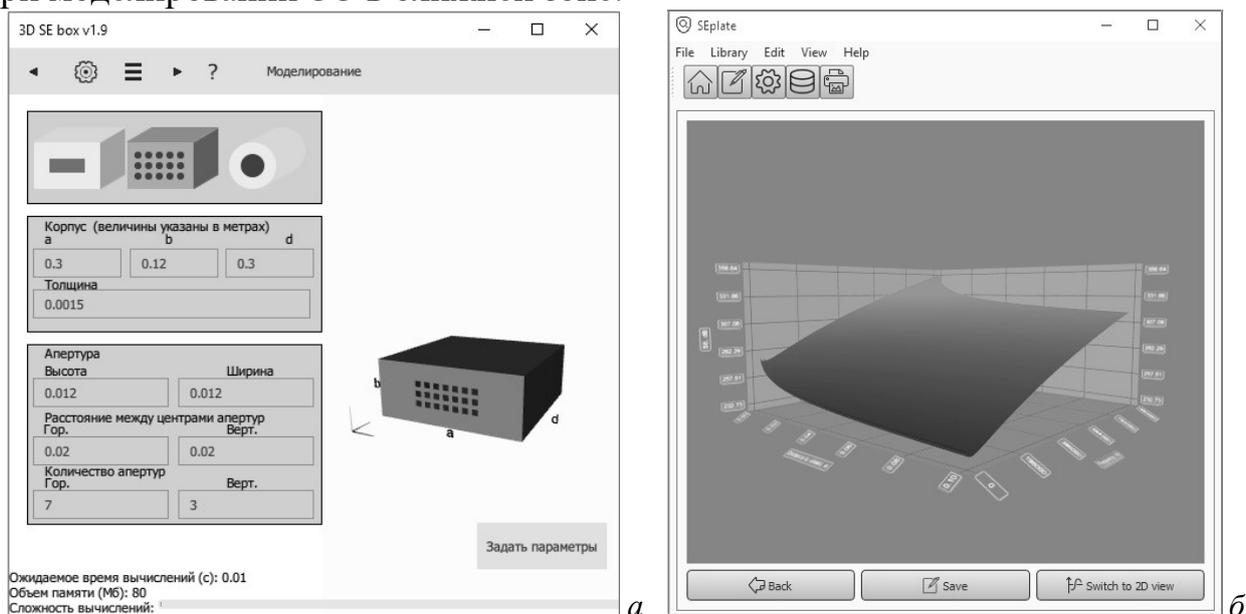


Рисунок 3.1 – Стартовое окно ПО для моделирования ЭК РЭС (а) и пример трехмерного отображения ЭЭ в ПО для моделирования экранирующих материалов (б)

В подразделе 3.3 разработан, программно реализован и протестирован алгоритм для моделирования ЭК по ММЛП. Вычислена ЭЭ многоуровневой ЭК, состоящей из двух корпусов ($300 \times 120 \times 300 \text{ мм}^3$ и $80 \times 40 \times 80 \text{ мм}^3$). Показано, что изменение расположения вложенного корпуса в многоуровневой ЭК может улучшить его ЭЭ на 30 дБ (рисунок 3.2). Выполнено моделирование электромагнитных эмиссий от симметричных электрических вибраторов с различными длинами, расположенных внутри многоуровневой ЭК. Показано, что при совпадении резонансных частот корпусов с рабочими частотами вибраторов уровень эмиссий снаружи ЭК может увеличиться до 1,3 кВ/м. По результатам моделирования разработана методика для оптимизации ЭК РЭС.

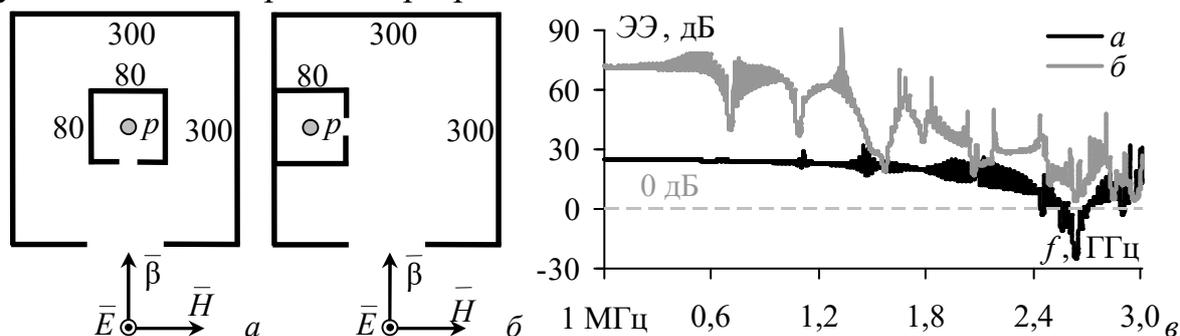


Рисунок 3.2 – Виды сверху многоуровневой ЭК с худшей (а) и лучшей (б) ЭЭ и частотные зависимости ЭЭ этих конструкций (в)

4 Разработка устройства для косвенных измерений эффективности экранирования металлических корпусов радиоэлектронных средств

В подразделе 4.1 предложена модификация методики для косвенных измерений ЭЭ без внесения внутрь ЭК антенны или датчика поля, подходящая для цилиндрических корпусов с апертурой в торцевой стенке. На первом шаге этой методики над апертурой корпуса размещается проводник, образующий с

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{1 - [\chi_{mn} \lambda / (2\pi r)]^2} \quad (6)$$

$$k_g = 2\pi \sqrt{1 - [\chi_{mn} \lambda / (2\pi r)]^2} \lambda^{-1} \quad (7)$$

поверхностью корпуса ЛП с волновым сопротивлением 50 Ом. Выполняются измерения частотной зависимости модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ при подключении согласованной нагрузки к одной из сторон получившейся ЛП. Значения $|S_{11}|$ преобразуются в Z -параметры, из которых вычисляется импеданс Z_{ap} для стенки с апертурой. Для последующих вычислений ЭЭ используется эквивалентная схема, в которой корпус заменяется короткозамкнутым волноводом. При преобразовании эквивалентной схемы для вычисления k_g и Z_g для цилиндрического корпуса предложено использовать выражения (6)–(7), в которых r – радиус корпуса, χ_{mn} – n -й корень функции Бесселя m -го порядка.

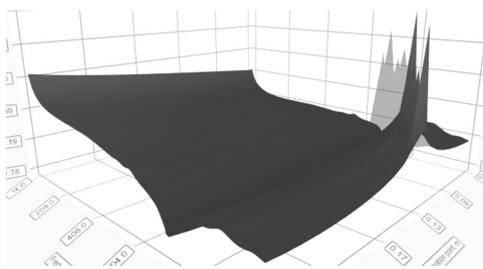


Рисунок 4.1 – Пример трехмерного отображения ЭЭ в созданном ПО

Разработано ПО лабораторного макета устройства для косвенных измерений ЭЭ, предназначенное для пересчета $|S_{11}|$ в ЭЭ цилиндрического или прямоугольного корпуса. Особенностью этого ПО является возможность вычисления и отображения трехмерных зависимостей ЭЭ от частоты и положения точки наблюдения внутри корпуса.

В подразделе 4.2 предложены 4 варианта оснастки для косвенных измерений ЭЭ на основе: подвешенной микрополосковой линии (МПЛ), ТЕМ-камеры, МПЛ на печатной плате и свёртывающейся металлической ленты (рисунок 4.1). С помощью оснастки и разработанного ПО получены частотные зависимости ЭЭ типовых цилиндрического и прямоугольного корпусов. Описаны основные преимущества и недостатки предложенной оснастки.

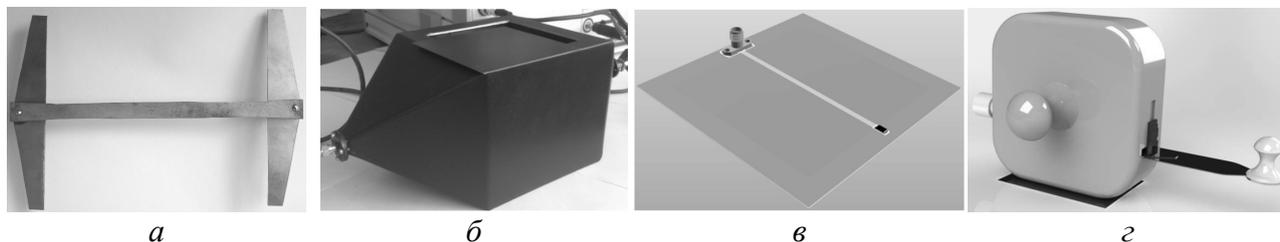


Рисунок 4.2 – Предложенные варианты измерительной оснастки на основе МПЛ (а), ТЕМ-камеры (б), МПЛ на печатной плате (в), свёртывающейся ленты (г)

На рисунке 4.3а приведены частотные зависимости ЭЭ в центре корпуса $300 \times 120 \times 300 \text{ мм}^3$ с апертурой $80 \times 80 \text{ мм}^2$, полученные косвенными измерениями, а также с помощью моделирования аналитическим методом, МКЭ и ММЛП. Для получения $|S_{11}|$ при косвенных измерениях использовались

анализатор цепей «Микран» Р2М-40 и оснастка на основе подвешенной МПЛ. Из рисунка видно, что с косвенными измерениями лучше всего согласуются результаты вычислений по МКЭ ($\Delta = 3,3$ дБ). В диапазоне частот от 0,3 ГГц для всех частотных зависимостей значение Δ не превышает 3,5 дБ. На рисунке 4.3б приведены частотные зависимости ЭЭ в центре цилиндрического корпуса длиной 300 мм с $r=150$ мм и круглой апертурой радиусом 40 мм на торце. Зависимости получены с помощью МКЭ, ММЛП, а также по методике из подраздела 4.1. Значения $|S_{11}|$ определялись с помощью электродинамического моделирования по МКРВО, при этом использовалась оснастка в виде МПЛ на печатной плате. Из рисунка 4.3б видно, что результаты, полученные разными методами, согласуются. Значения Δ для косвенной оценки ЭЭ составили 3,2 дБ (относительно МКЭ) и 6,1 дБ (относительно ММЛП).

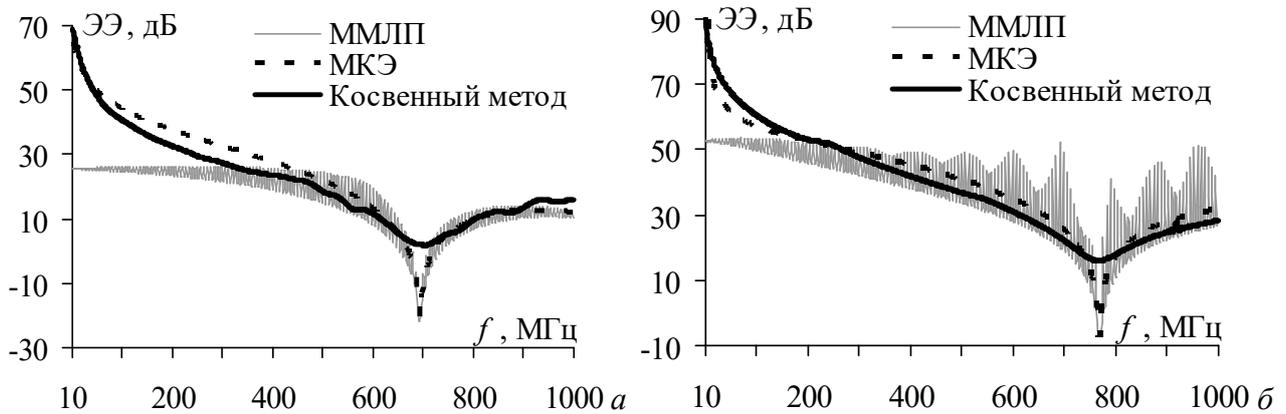


Рисунок 4.3 – Частотные зависимости ЭЭ прямоугольного (а) и цилиндрического (б) корпусов с апертурами

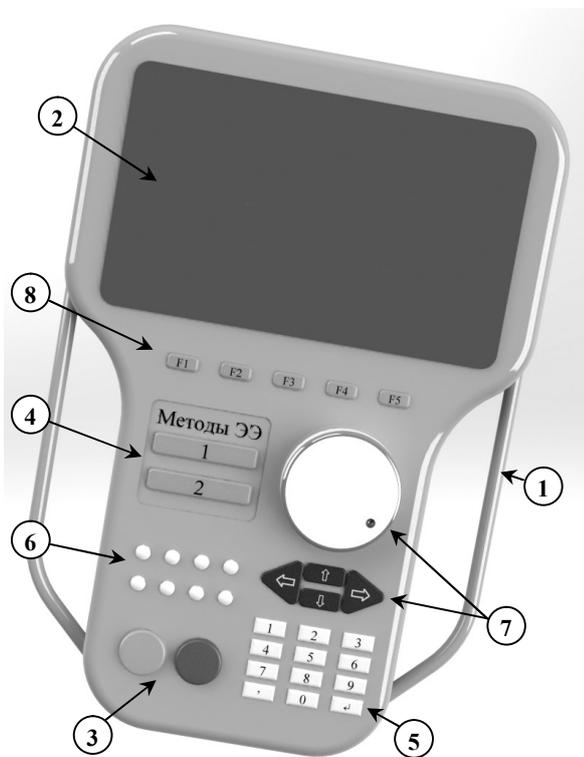


Рисунок 4.4 – Внешний облик устройства для косвенный измерений ЭЭ

В подразделе 4.3 разработана структурная схема аппаратной части устройства для косвенных измерений ЭЭ. Создана модель устройства (рисунок 4.4), отражающая его предполагаемый внешний облик. Модель состоит из корпуса с ручками 1 для удержания устройства. В верхней части располагается дисплей 2, а в нижней – элементы управления устройством: 3 – начало и завершение измерений; 4 – выбор формы ЭК; 5 – ввод размеров ЭК и точек наблюдения внутри неё; 6 – вызов настроек частотного диапазона, точек наблюдения и т.п.; 7 – регулировки маркеров на измеренной частотной зависимости ЭЭ; 8 – сохранение режима работы устройства. Для подключения измерительной оснастки в задней части модели предусмотрен SMA соединитель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования. Выполнен обзор устройств и методов оценки ЭЭ ЭК, а также материалов, применяющихся для их изготовления. Разработаны аналитические методы для оценки ЭЭ типовых ЭК, отличающиеся учетом их заполнения диэлектрическими структурами, РПМ, проводящими пластинами или печатными платами. Разработаны методы моделирования апертур в типовых ЭК: прямоугольной апертуры с произвольным положением в стенке ЭК; массива апертур, расположенных в шахматном порядке; прямоугольной апертуры, заполненной диэлектрическим или магнитным материалом. Предложены модификации аналитического метода оценки ЭЭ плоских многослойных экранов, позволившие применить его для экранов, выполненных из полимерных композитных материалов. Разработаны алгоритмы и ПО для моделирования ЭК и материалов на основе аналитических методов. Разработан и программно реализован алгоритм для моделирования ЭК по ММЛП. С его помощью вычислена ЭЭ различных вариантов многоуровневой ЭК, состоящей из двух прямоугольных корпусов. Предложена методика оптимизации произвольных ЭК РЭС. Разработана методика для оценки ЭЭ на основе $|S_{11}|$, пригодная для цилиндрических ЭК. Создан прототип ПО устройства для косвенного измерения ЭЭ металлических ЭК РЭС. Предложено 4 варианта измерительной оснастки для косвенных измерений ЭЭ на основе: подвешенной МЛП, ТЕМ-камеры, двухсторонней печатной платы и свёртывающейся ленты. Используя разработанные оснастку и ПО, выполнены косвенные измерения ЭЭ типовых ЭК. Разработана структурная схема аппаратной части устройства и создан его внешний облик. В итоге решена задача совершенствования моделирования и измерений ЭК РЭС, имеющая большое значение для развития технических наук.

Рекомендации. Разработанные методы и ПО целесообразно применять для предварительной оценки ЭЭ на ранних этапах проектирования ЭК РЭС. Для подтверждения результатов этой оценки, а также для детального исследования ЭК, перед их изготовлением и проведением испытаний можно использовать разработанный алгоритм на основе ММЛП. Оснастку и устройство для косвенных измерений ЭЭ целесообразно использовать на завершающих этапах проектирования ЭК: для определения ЭЭ в лабораторных условиях (до измерений с помощью сертифицированной экспериментальной установки) или при корректировке прототипа ЭК (когда её параметры определены, но можно изменить расположение элементов РЭС внутри неё, добавить экранирующие прокладки, РПМ и т.д.). Описанные подходы к моделированию и измерениям ЭК также могут использоваться в рамках образовательного процесса, а также в качестве основы для дальнейших исследований.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Целесообразна разработка методов моделирования типовых ЭК, которые не рассмотрены в данной работе, например для корпуса с апертурой, покрытой проводящей пластиной. Перспективны исследования влияния компоновки элементов РЭС на ЭЭ ЭК, а также исследования, направленные на повышение ЭЭ ЭК за счет использования

частотно-селективных структур. Целесообразно создание системы автоматизированного проектирования ЭК РЭС с возможностью моделирования ЭЭ аналитическими и численными методами. В части совершенствования устройства для измерений ЭЭ, целесообразно рассмотреть другие варианты оснастки, например на основе экранированной полосковой линии или КПЛ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Иванов А.А. Обзор аналитических моделей для оценки эффективности экранирования металлических корпусов на основе метода эквивалентной цепи / А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 2. – С. 110–142.

2. Иванов А.А. Прототип программного модуля для оценки эффективности экранирования корпусов радиоэлектронных средств / А.А. Иванов, А.А. Квасников, С.П. Куксенко, М.Е. Комнатнов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2019. – № 4 (71). – С. 5–15.

3. Квасников А.А. Программное обеспечение для проектирования оптимальной сети высоковольтного электропитания космического аппарата / А.А. Квасников, С.П. Куксенко, А.А. Иванов // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем». – 2020. – Т. 3. – С. 100–107.

4. Иванов А.А. Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой / Иванов А.А., Комнатнов М.Е. // Доклады ТУСУРа. – 2021. – Т. 24, № 1. – С. 16–23.

Статья в журнале, входящем в Q1 Scopus

5. Ivanov A.A. Analytical model for evaluating shielding effectiveness of an enclosure populated with conducting plates / A.A. Ivanov, M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 2020. – Vol. 62, no. 5. – P. 2307–2310.

Статьи в изданиях, индексируемых WoS и Scopus

6. Ivanov A.A. Analytical model for estimating the shielding effectiveness of cylindrical connectors / A.A. Ivanov, M.E. Komnatnov // IOP Conference series: Materials science and engineering. – 2019. – Vol. 560. – P. 1–6.

7. Ivanov A.A. Model for estimating the shielding effectiveness of an enclosure with a perforated wall / A.A. Ivanov, M.E. Komnatnov // IOP Conference series: Materials science and engineering. – 2020. – Vol. 734. – P. 1–6.

8. Chernikova E.B. Using composite insulating materials to improve modal filter performance / E.B. Chernikova, A.A. Ivanov // International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electronic devices (EDM 2020). – Russia, 29 June–3 July 2020. – P. 1–4.

9. Ivanov A.A. Analytical model of a shielding enclosure populated with arbitrary dielectric obstacles / A.A. Ivanov, M.E. Komnatnov // Journal of physics: Conference series. – 2021. – Vol. 1889. – P. 1–6.

10. Analytical model and software for evaluating the shielding materials properties / A.A. Ivanov, A.A. Kvasnikov, I.A. Onishchenko et al. // International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electronic devices (EDM 2021). – Russia, 30 June–4 July 2021. – P. 1–4.

Доклады в трудах международных конференций

11. Комнатнов М.Е. Эффективность экранирования металлическим корпусом с апертурами / М.Е. Комнатнов, А.А. Иванов, Р.В. Рубченков // Материалы международной научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР–2016». – Томск, Россия. – 2016. – С. 306–309.

12. Иванов А.А. Реализация метода оценки эффективности экранирования корпусом с апертурой // Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР–2018». – Томск, Россия, 16–18 мая, 2018. – Ч. 2. – С. 254–257.

13. Иванов А.А. Анализ и сравнение аналитических методов оценки эффективности экранирования корпусов с перфорированной стенкой // Материалы XIV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 28–30 ноября, 2018. – С. 328–333.

14. Иванов А.А. Модель для оценки эффективности экранирования цилиндрического корпуса с диэлектрическим заполнением // Материалы XVI Международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск, Россия, 23–26 апреля 2019 г. – Ч. 7. – С. 59–61.

15. Иванов А.А. Разработка алгоритма для оценки эффективности экранирования прямоугольного корпуса методом матрицы линий передачи // Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР–2019». – Томск, Россия, 22–24 мая 2019 г. – Ч. 1. – С. 255–258.

16. Бокова К.А. Оценка эффективности экранирования корпуса мультиплексора FOX-515 / К.А. Бокова, А.А. Иванов // Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР–2019». – Томск, Россия, 22–24 мая 2019 г. – Ч. 1. – С. 259–262.

17. Иванов А.А. Моделирование эффективности экранирования корпуса с покрытием из композитного материала / А.А. Иванов, А.В. Демаков // Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Молодежь и современные информационные технологии». – Томск, Россия, 17–20 февраля 2020 г. – С. 87–88.

18. Ivanov A.A. Shielding properties of an enclosure filled with ice / A.A. Ivanov, K.A. Bokova. // Proceeding of TUSUR Scientific Session. – Tomsk, Russia, 25–27 May 2020. – Vol. 2. – P. 312–314.

19. Иванов А.А. Аналитическая модель для оценки эффективности экранирования многослойных композиционных материалов / А.А. Иванов, А.В. Демаков // Материалы XVII Международной конференции «Перспективы

развития фундаментальных наук». – Томск, Россия, 21–24 апреля 2020 г. – Т. 7. – С. 47–49.

20. Ivanov A.A. Analytical model for evaluating shielding effectiveness of an enclosure with a partial dielectric cross-section filling / A.A. Ivanov // Proceeding of International scientific conference on electronic devices and control systems. – Tomsk, Russia, 18–20 Nov. 2020. – no. 2 – P. 222–224.

Доклад в трудах региональной конференции

21. Онищенко И.А. Разработка программы для вычисления эффективности экранирования корпуса с апертурой на основе модуля коэффициента отражения / И.А. Онищенко, А.А. Иванов // Материалы региональной научно-практической конференции «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – Томск, Россия, 2020. – С. 283–285.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615414 РФ. 3D SE BOX 2020 / А.А. Квасников, А.А. Иванов, С.П. Куксенко, М.Е. Комнатнов – Заявка № 2020614561. Дата поступления 21.05.2020. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.05.20.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021611772 РФ. Вычисление эффективности экранирования металлических конструкций на основе частотной зависимости модуля коэффициента отражения / А.А. Иванов, И.А. Онищенко. – Заявка № 2020663411. Дата поступления 02.11.2020. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.02.2021.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660961 РФ. Вычисление эффективности экранирования металлов, сплавов и композиционных материалов / А.А. Иванов, И.А. Онищенко, А.А. Квасников, М.Е. Комнатнов. – Заявка № 2021619699. Дата поступления 23.06.2021. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.07.2021.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660469 РФ. FEM2D 2021 / Д.В. Клюкин, А.А. Квасников, С.П. Куксенко, А.А. Иванов, М.Е. Комнатнов. – Заявка № 2021619672. Дата поступления 23.06.2021. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.06.2021.

Патенты

26. Пат. № 2728325 РФ. Аппаратно-программный комплекс для синтеза и испытаний оптимальной сети высоковольтного электропитания. / М.Е. Комнатнов, С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.В. Демаков, А.В. Осинцев, А.А. Собко, А.А. Иванов, А.А. Квасников (РФ). – № 2019140938; заявл. 09.12.2019. опубл. 29.07.2020, Бюл. № 22.

27. Заявка 2020131978 РФ. Коаксиальная камера для измерения эффективности электромагнитного экранирования радиопоглощающих материалов. / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, А.А. Иванов, И.И. Николаев, Т.Р. Газизов (РФ). – № 2020131978; заявл. 29.09.2020. Решение о выдаче патента от 23.06.2021.