Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.94

Лихачев
Артем Андреевич

Программное средство для моделирования взаимодействия электромагнитного излучения с многослойными поглощающими материалами

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра
по специальности 7-06-0717-01 «Нанотехнологии и наноматериалы»

_____
(подпись магистранта)

Научный руководитель
Баранова Мария Сергеевна
Кандидат физ.-мат. наук

_____
(подпись научного руководителя)

Минск 2026

ВВЕДЕНИЕ

Современные радиоэлектронные и телекоммуникационные системы всё чаще сталкиваются с необходимостью обеспечения электромагнитной совместимости и защиты от нежелательного внешнего и внутреннего электромагнитного излучения (ЭМИ). В условиях роста плотности размещения функциональных элементов и расширения рабочих частотных диапазонов традиционные металлические экраны становятся всё менее эффективными вследствие высокого коэффициента отражения и чувствительности к качеству электрических контактов.

Одним из перспективных решений данной проблемы является применение углеродсодержащих волокнистых материалов (УВМ) в качестве широкополосных поглотителей ЭМИ. Такие материалы обладают рядом преимуществ: низкой плотностью, высокой механической прочностью, хорошей электропроводностью и возможностью тонкой настройки электродинамических параметров за счёт изменения микроструктуры. Основными физическими механизмами поглощения в УВМ выступают омические потери, обусловленные проводимостью углеродных волокон, а также магнитные потери при введении ферромагнитных включений. Это позволяет эффективно поглощать электромагнитную энергию в широком диапазоне частот, в частности в СВЧ-области от 2 до 17 ГГц.

Тема диссертационной работы является актуальной, поскольку направлена на создание программного инструмента для оптимизации параметров многослойных поглотителей ЭМИ, что позволяет сократить объем дорогостоящих натурных экспериментов и ускорить процесс разработки новых экранов ЭМИ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнялась в рамках заданий Государственной программы научных исследований (ГПНИ) по теме «Разработка моделей взаимодействия электромагнитного излучения с волокнистыми материалами» (ГБЦ НИР 3060-2024, срок выполнения 2024-2025 гг.) №0240756 , а также молодежного гранта Министерства образования № 25-3164М №20250583 на тему «Разработка специального программного модуля для моделирования взаимодействия электромагнитного излучения с многослойными поглощающими материалами» (срок выполнения 2025 г.).

Цель работы – разработка и программная реализация специализированного вычислительного модуля для моделирования коэффициентов отражения и пропускания электромагнитного излучения в диапазоне от 2 до 17 ГГц многослойными композитами на основе углеродсодержащих волокнистых материалов с учётом их микро- и макроструктуры.

Задачи исследования:

– Провести анализ существующих математических моделей взаимодействия электромагнитного излучения с поглощающими материалами (уравнений Максвелла, метода эквивалентных схем, теории эффективной среды) и выявить их ограничения при расчёте гетерогенных композитов.

– Разработать комбинированную модель, сочетающую приближение Браггемана для слоёв с дисперсными включениями, эквивалентные *RLC*-контуры для углеродсодержащего волокнистого слоя и метод характеристических матриц для расчёта многослойной структуры.

– Разработать и реализовать на языке *Python* специализированный программный комплекс, включающий модуль автоматического извлечения численных данных из графиков и модуль расчёта электродинамических характеристик.

– Провести верификацию предложенной модели и разработанного программного средства на основе экспериментальных данных для однослойных и многослойных композитов.

Объект исследования – многослойные поглощающие композиты на основе углеродсодержащих волокнистых материалов и полимерных матриц, а также процесс их взаимодействия с электромагнитным излучением в СВЧ-диапазоне.

Предмет исследования – математические модели, алгоритмы и программные средства для расчёта и прогнозирования электродинамических характеристик (коэффициентов отражения и пропускания) многослойных поглощающих материалов.

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад автора, заключающийся в проведении анализа существующих математических моделей взаимодействия ЭМИ с материалами, разработке гибридной модели, ее программной реализации на языке *Python*, а также в проведении численного моделирования, обработке и интерпретации полученных результатов. Совместно с научным руководителем кандидатом физико-математических наук М. С. Барановой были определены структура, цели и задачи исследования, обобщены основные научные результаты.

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 2 научных работах (тезисах докладов на научных конференциях).

Диссертация состоит введения, четырех глав с краткими выводами, заключения, списка использованных источников.

Общий объем диссертационной работы составляет 76 страниц машинописного текста, включая 34 рисунка, 2 таблицы, библиографический список из 28 наименований на 3 страницах, 1приложение.

Положение, выносимое на защиту

Предложенная модель взаимодействия электромагнитного излучения, основанная на приближении Браггемана и методе эквивалентных схем, с многослойными поглощающими материалами, позволяет учитывать микроструктуру композитных слоёв, а разработанный на её основе программный модуль обеспечивает прогнозирование коэффициентов отражения и пропускания в диапазоне частот от 2 до 17 ГГц с отклонением от экспериментальных данных не более чем на величину от 1 до 2 дБ в рабочем диапазоне от 4 до 12 ГГц, что подтверждено верификацией на трёхслойных структурах из углеродсодержащих волокнистых материалов и полимерных матриц с дисперсными включениями.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе проведён анализ существующих подходов к моделированию взаимодействия электромагнитного излучения с материалами. Рассмотрены уравнения Максвелла и численные методы их решения, метод эквивалентных схем и теория эффективной среды. Установлено, что прямое численное решение уравнений Максвелла требует значительных вычислительных ресурсов, а классические приближения теории эффективной среды не учитывают специфику волокнистой структуры углеродсодержащих материалов. Проведён обзор углеродсодержащих материалов и показано их преимущество перед традиционными металлическими экранами.

Во второй главе предложена гибридная математическая модель для расчёта электродинамических характеристик многослойных поглощающих материалов. Модель объединяет три уровня описания: приближение Браггемана для композитных слоёв с дисперсными включениями оксидов, метод эквивалентных *RLC*-контуров для учёта микроструктуры углеродного волокнистого слоя и метод характеристических матриц для расчёта многослойной структуры в целом. Схематически иерархия предложенного подхода показана на рисунке 1. Проведена верификация модели на экспериментальных данных для однослойных полимерных композитов (акрил, полиуретан, силикон) с включениями оксидов алюминия, титана и цинка. Показано адекватное соответствие расчётов эксперименту в диапазоне частот от 2 до 14 ГГц.



Рисунок 1 – Иерархия предложенных моделей

В третьей главе осуществлена программная реализация предложенной модели на языке *Python*. Разработан специализированный программный комплекс, включающий два модуля: модуль автоматизированного извлечения численных данных из растровых изображений экспериментальных графиков с применением алгоритмов компьютерного зрения в цветовом пространстве

HSV и модуль расчёта и визуализации электродинамических характеристик. На рисунке 2 показан внешний вид интерфейса разработанной программы.

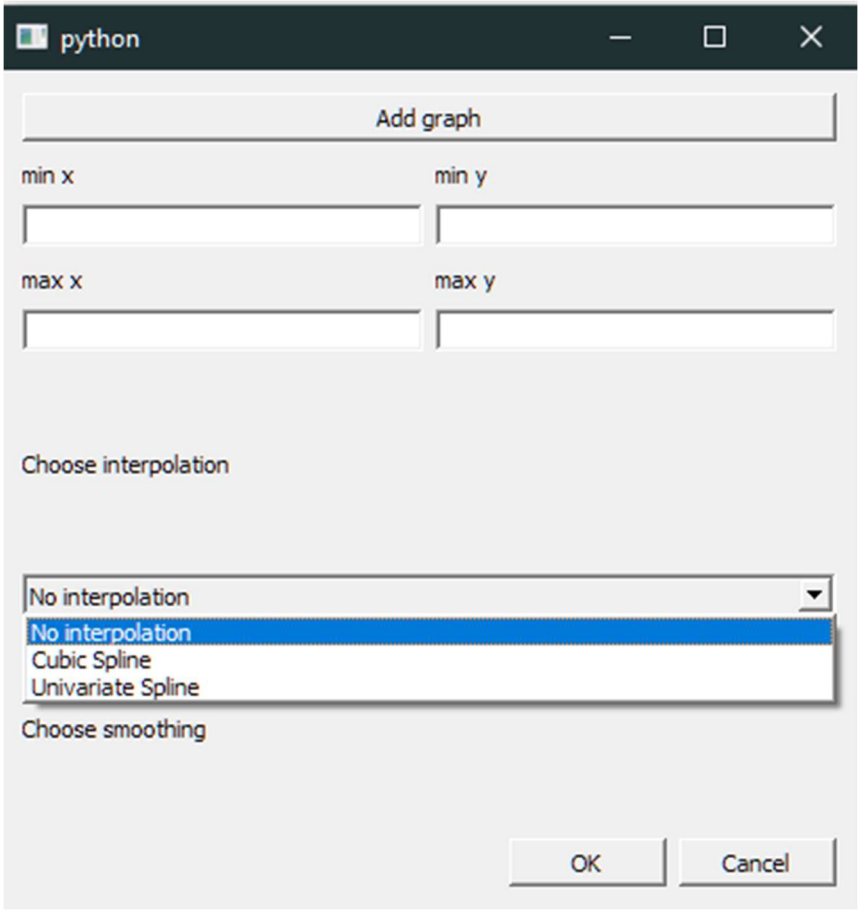


Рисунок 2 – Интерфейс разработанного программного модуля

В четвёртой главе проведено численное моделирование влияния геометрических и электрофизических параметров трёхслойных композитов на коэффициенты отражения и пропускания в диапазоне частот от 2 до 17 ГГц. Установлено, что толщина углеродного волокнистого слоя является определяющим фактором для коэффициента пропускания (варьирование от 0,1 до 0,5 мм обеспечивает снижение на 18 дБ). На рисунке 3 показана зависимость коэффициента пропускания от толщины. Оптимальная толщина первого полимерного слоя составляет от 2 до 4 мм, третьего слоя – 1 мм. Для систем с оксидными наполнителями оптимальная концентрация находится в диапазоне от 0,15 до 0,25. Показано, что для эффективного поглощения в диапазоне от 2 до 8 ГГц предпочтительно использование диоксида титана. Повышение проводимости углеродного слоя от 500 до 1500 См/м снижает коэффициент пропускания в среднем на 10 дБ.

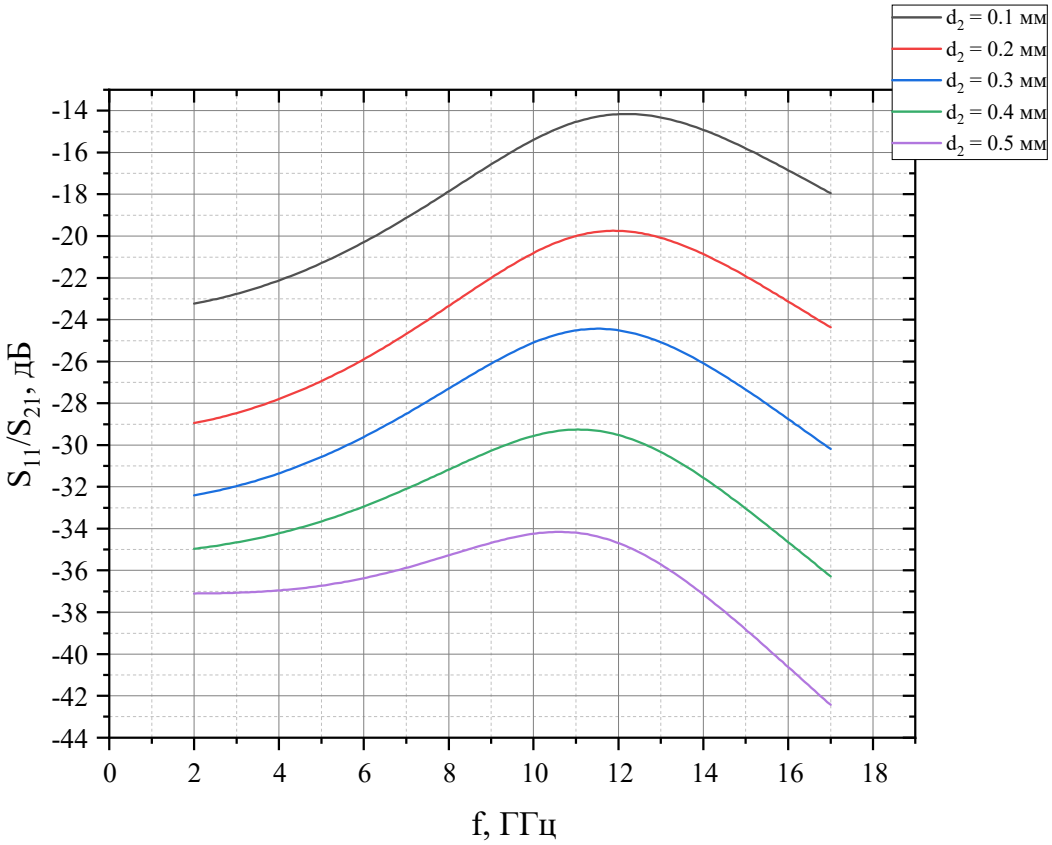


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента пропускания от частоты при изменении толщины слоя УВМ, состоящего из акрилового полимера с частицами оксида цинка и УВМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ существующих подходов к моделированию взаимодействия электромагнитного излучения с материалами показал наличие недостатков классических методов. Прямое численное решение уравнений Максвелла требует значительных вычислительных ресурсов, а стандартные приближения теории эффективной среды не учитывают специфику волокнистой микроструктуры. В качестве решения была создана и верифицирована иерархическая физико-математическая модель. Она позволяет прогнозировать частотные зависимости коэффициентов отражения и пропускания в диапазоне от 2 до 17 ГГц для многослойных композитов на основе углеродсодержащих волокнистых материалов. Разработанный подход объединяет приближение Браггемана для описания слоев с дисперсными оксидными включениями, метод эквивалентных *RLC*-контуров для учета микроструктуры углеродного волокна и метод характеристических матриц для расчета многослойной структуры в целом.

На основе предложенной теоретической базы реализован специализированный программный комплекс на языке *Python*. Приложение включает два взаимосвязанных модуля. Первый модуль автоматизирует извлечение численных данных из растровых изображений экспериментальных графиков с применением алгоритмов компьютерного зрения, что исключает субъективные погрешности ручного переноса. Второй модуль выполняет расчет электродинамических характеристик и визуализацию результатов. Архитектура программного обеспечения построена по модульному принципу, что обеспечивает его расширяемость и удобство использования при параметрическом анализе экранирующих свойств композитов.

Верификация модели на экспериментальных данных подтвердила ее адекватность для однослойных полимерных матриц с оксидными наполнителями. Для трехслойных структур хорошее соответствие расчетных и экспериментальных значений наблюдается в диапазоне от 4 до 12 ГГц. Расхождения на границах частотного диапазона обусловлены упрощениями, заложенными в модель эквивалентных схем для волокнистого слоя. Проведенное численное моделирование позволило выявить ключевые закономерности влияния геометрических и электрофизических параметров на экранирующую эффективность. Установлено, что толщина углеродного волокнистого слоя является определяющим фактором для коэффициента пропускания, а оптимальная концентрация дисперсных включений в полимерной матрице подчиняется экстремальной зависимости. Сформулированы практические рекомендации по оптимизации состава и архитектуры многослойных поглотителей, в частности обоснован выбор

диоксида титана в качестве наиболее эффективного наполнителя для низкочастотной области спектра.

Научная новизна работы заключается в развитии модели эффективной среды за счет интеграции эквивалентных *RLC*-контуров для описания углеродных волокон и ее программной реализации, позволяющей проводить анализ без привлечения трудоемких методов численного моделирования. Практическая значимость заключена в создании готового к применению программного инструмента, который может быть использован для проектирования экранов ЭМИ и снижения затрат на экспериментальные исследования. Достоверность полученных результатов подтверждена как теорией, так и сравнением с экспериментальными данными.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1. Мокеров В. С. Электромагнитные экраны СВЧ-диапазона на основе углеткани и силиконового герметика / В. С. Мокеров, А.А. Лихачев, О. В. Бойправ, М. С. Баранова // IV Республиканский форум молодых ученых учреждений высшего образования: сборник материалов форума. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2025. – С. 48-49.

2. Baranava M. Advanced Approach Based on Physics-Informed Neural Networks for Materials Microwave Shielding Effectiveness Prediction / M. Baranava, O. Boiprav, M. Hasanov, A. Likhachou, V. Mokerov // в печати Advancement and Innovation: Artificial Intelligence and Machine Learning I International Scientific-Practical Conference.

3. Лихачев, А. А. Программная реализация методов моделирования взаимодействия электромагнитного излучения с углеродными нанокомпозитами = Software Implementation of Methods for Modeling the Interaction of Electromagnetic Radiation with Carbon Nanocomposites / А. А. Лихачев, М. С. Баранова, А. Л. Данилюк // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22, № 1. – С. 100–107.

4. Лихачев, А. А. Метод вложения в моделях эффективной среды для учёта взаимодействия электромагнитного излучения с нанокомпозитом / А. А. Лихачев, М. С. Баранова, А. Л. Данилюк // Современные проблемы физики - 2024: сб. науч. тр. – Минск : «Ковчег», 2024. – С. 108–111.

5. Лихачев А. А. Моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с многокомпонентным углеродным нанокомпозитом / А. А. Лихачев, М. С. Баранова // Тезисы докладов XXI Международной научной конференции молодых ученых. В двух частях. Ч. 2. Медицинские, физико-математические, физико-технические науки, химия и науки о Земле : тезисы докладов, Минск, 29–31 октября 2024 г. – Минск : Беларуская навука, 2024. – С. 328-330.