

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

Чупахин Александр Сергеевич

УДК 537.87

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ, СОЗДАЮЩЕГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В КИНОКОНЦЕРТНЫХ КОМПЛЕКСАХ**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ (технические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Павлыш Владимир Николаевич

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ КИНОКОНЦЕРТНЫХ ЗАЛОВ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	14
1.1 Электромагнитная совместимость как одно из основных требований к оборудованию киноконцертных залов	14
1.2 Сравнительный анализ допустимых уровней эмиссии и чувствительности кинотехнологического оборудования	25
1.2.1 Сравнение регламентированных уровней помех и чувствительности по полю	28
1.2.2 Сравнение регламентированных уровней помех и чувствительности в кондуктивной среде	29
1.3 Цель и задачи исследования	32
1.4 Выводы	33
РАЗДЕЛ 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С УЧЁТОМ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ	35
2.1 Источники и типы механических возмущений, влияющих на электромагнитное поле	35
2.2 Характеристики процесса эмиссии электромагнитного поля вибрирующим стержнем из металла неферромагнитной группы	39
2.3 Определение продольных колебаний стержня в поперечном постоянном магнитном поле	46
2.4 Ферромагнитный экран как источник помех звукового диапазона частот	52
2.4.1 Изгибные колебания ферромагнитного диска в постоянном магнитном поле	53
2.4.2 Определение параметров переменного магнитного поля, создаваемого вибрирующим ферромагнитным диском	62
2.5 Метод определения уровня низкочастотных помех, вызванных ферромагнитным компонентом на печатной плате	70
2.5.1 Применение теоремы о наведенном магнитном потоке	70
2.5.2 Оценка напряжения помех на печатной плате	74
2.6. Выводы	85
РАЗДЕЛ 3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ КИНОКОНЦЕРТНОГО КОМПЛЕКСА	87

3.1 Анализ способов контроля электромагнитной обстановки	87
3.2 Математическая модель электромагнитной обстановки помещения аппаратной киноконцертного комплекса и численный алгоритм её реализации	89
3.3 Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных	101
3.4 Выводы	103
РАЗДЕЛ 4 КОМПЛЕКСНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГЛАМЕНТИРУЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В КИНОКОНЦЕРТНОМ ЗАЛЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ	104
4.1 Комплексный подход к решению задачи обеспечения электромагнитной совместимости.	104
4.2 Вычислительный алгоритм оценки эффективности защиты от электромагнитных полей в зависимости от параметров экранирующих материалов	108
4.3 Аппаратно-программный комплекс проектирования гибридных помехоподавляющих фильтров	124
4.3.1 Обоснование и структура алгоритма исследования ЭМС в кондуктивной среде	125
4.4 Задача управления параметрами технических элементов оборудования киноконцертных комплексов	131
4.4.1 Особенности уменьшения коммутационных помех в полумостовом усилителе класса D	131
4.4.2 Моделирование работы схемы полумостового усилителя класса D с мягкой коммутацией в среде Multisim и сравнение методов расчета	142
4.5 Рекомендации по практическому применению результатов.	145
4.6 Выводы	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	159
ПРИЛОЖЕНИЯ	182
Приложение А. Листинг программы моделирования электромагнитной обстановки на языке C#	183
Приложение Б. Листинг программы оценки эффективности защиты от электромагнитных полей в зависимости от параметров экранирующих материалов в среде MATLAB	193
Приложение В. Листинг программы проектирования и подбора помехоподавляющих фильтров на языке C++	200
Приложение Г. Акты внедрения	213

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВЧ	— высокие частоты;
ИВЭП	— источник вторичного электропитания;
ИП	— источник помех;
КТО	— кинотехнологическое оборудование;
ЗТО	— звукотехническое оборудование;
ППЭ	— плотность потока энергии;
РП	— receptor помех;
ТС	— техническое средство;
ШИМ	— широтно-импульсная модуляция;
ППФ	— помехоподавляющий фильтр;
ЭМПоле	— электромагнитное поле;
ЭМС	— электромагнитная совместимость;
ЭМО	— электромагнитная обстановка;
ЭМП	— электромагнитные помехи;
ЭМИ	— электромагнитное излучение;
ЭСР	— электростатические разряды.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современный киноконцертный комплекс – это сложный радиоэлектронный информационный объект, содержащий большое количество источников электромагнитного излучения и расположенных в зоне их влияния чувствительных к воздействию электромагнитных явлений рецепторов. В результате возникают нарушения в работе приборов, оборудования и сетей в составе киноконцертного комплекса, содержащих чувствительные информационные элементы.

Сложность и разнообразие инфраструктуры киноконцертного зала приводит к необходимости предусмотреть возможность применения сигналов всех типов (звуковых, электромагнитных, видео), имеющих разные уровни и спектральный состав, что усложняет электромагнитную обстановку.

Любое техническое устройство – это источник электромагнитных помех (ЭМП) для одних устройств и одновременно receptor ЭМП относительно электромагнитных воздействий других устройств. Технические устройства киноконцертного комплекса работают совместно. Каждый receptor находится под общим электромагнитным воздействием ряда других устройств. Совокупность одновременно существующих электромагнитных воздействий на receptor определяет электромагнитную обстановку (ЭМО), в которой он должен функционировать. Прогнозирование и определение ЭМО предполагает выявление источников помех и является сложной задачей. В этой связи необходимо проводить исследование и контроль ЭМО на объектах для зрелищных мероприятий перед размещением в них современной информационной, звукотехнической, силовой и другой аппаратуры с целью прогнозирования условий обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС).

Вопросы, связанные с проблемой обеспечения ЭМС, необходимо решать на начальной стадии проектирования аппаратуры, когда возможности

применения адекватных средств практически не ограничены при минимальных затратах.

В настоящее время данные задачи решаются в каждом конкретном случае путем подбора аппаратуры согласно регламентирующим стандартам во многом путем принятия интуитивных решений на базе имеющегося опыта.

На современном этапе для решения подобных задач необходимо применять системный подход, который заключается в определении характеристик устройств, описании и анализе связей, систематизации и организации системы в целом.

В этой связи обоснование методов и средств обеспечения электромагнитной совместимости с применением математического моделирования и системного анализа является актуальной научно-технической задачей, имеющей отраслевое значение.

Степень разработанности темы исследования. Об актуальности рассматриваемой проблемы свидетельствуют многочисленные публикации в периодических изданиях, книгах, проведение международных семинаров, конференций и симпозиумов, например: в Брюгге (Бельгия) – EMC Europe 2024, в Турине (Италия) EMC COMPO 2024; ежегодной Всероссийской научно-технической конференции «Электромагнитная совместимость»; формирование рабочей группы SC-05-05 Обществом инженеров-акустиков (AES) по разработке стандартов ЭМС для профессионального звукового оборудования.

Весомый вклад в исследовании проблемы ЭМС в электроакустическом оборудовании внесли: Пилинский В.В., Швайченко В.Б., Петрищев О.Н., Кечиев Л.Н., Валдрон Т., Отт Г., Барнс Д., Уайт Д., Армстронг К., Браун Д., Уитлок Б., и др.

Вместе с тем, до настоящего времени не выполнены работы по комплексному исследованию электромагнитной обстановки, вызванной источниками помех в кондуктивных цепях и в окружающей среде, созданию условий прогнозирования уровней и полос частот электромагнитных помех и рациональному выбору средств и мероприятий обеспечения электромагнитной

совместимости звукотехнического оборудования с другой электронной аппаратурой и электрической сетью, что обуславливает необходимость выполнения данной работы.

Связь с научными программами, планами, темами.

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет» в соответствии с планами работ по гостеме Н-2021-11 «Разработка математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для компьютерной поддержки принятия решений в управлении сложными динамическими системами и процессами» и в ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ УЧРЕЖДЕНИИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ «ШАХТЁРСКИЙ КОЛЛЕДЖ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ ИМЕНИ А.А. ХАНЖОНКОВА».

Цель и задачи исследования.

Цель – совершенствование методов и средств обеспечения электромагнитной совместимости оборудования в культурно-зрелищных объектах путем обоснования рациональных параметров аппаратуры, создающей электромагнитное поле, за счет применения математического моделирования процессов.

Для достижения цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи.

1. Анализ и систематизация технических средств, являющихся источниками и рецепторами электромагнитных полей в помещениях киноконцертного комплекса.

2. Математическое моделирование процессов, при которых возникают электромагнитные помехи в проводящей (кондуктивной) среде и окружающем пространстве.

3. Разработка алгоритмов комплексного анализа электромагнитной обстановки и программных средств прогнозирования электромагнитной совместимости на этапе проектирования киноконцертного комплекса.

4. Исследование электромагнитной обстановки и разработка рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости в киноконцертном комплексе.

Объект исследования: процессы, определяющие электромагнитную обстановку в киноконцертном комплексе, сформированные информационным, звукотехническим и кинотехнологическим оборудованием в окружающей и кондуктивной средах.

Предмет исследования: математические модели, алгоритмы и способы обоснования параметров аппаратуры, обеспечивающих электромагнитную совместимость в киноконцертном комплексе в условиях электромагнитных помех.

Методы исследования: основы теории электромагнитного поля для исследования электромагнитной обстановки в киноконцертном комплексе; методы математического и физического моделирования для оценки эффективности технических средств обеспечения ЭМС кинотехнологического и звукотехнического оборудования; проверка адекватности математической модели путем сравнения физических данных и теоретических результатов с использованием пакетов прикладных программ. Основными инструментами исследования являлись пакеты Multisim 14, Microsoft Excel, C++, C#, MATLAB.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые сформированы математические модели процессов и проведен анализ электромагнитной обстановки в локализованном объеме с учетом эмиссии от кинотехнологического оборудования в окружающее пространство, что позволяет выполнять прогнозирование электромагнитных параметров, обеспечивающих выполнение регламентных требований, на стадии проектирования комплекса.

2. Получили дальнейшее развитие методика и алгоритмы комплексного анализа электромагнитного поля применительно к исследованию электромагнитной обстановки в помещениях аппаратной киноконцертного комплекса с учетом вариации параметров размещенных источников и рецепторов.

3. Впервые показано, что источниками низкочастотных электромагнитных помех являются металлические элементы радиоэлектронной аппаратуры, создающие механические колебания при постоянном или низкочастотном магнитном поле, и определены способы устранения их отрицательного влияния.

Теоретическая значимость работы.

Теоретическая ценность работы заключается в раскрытии закономерностей формирования электромагнитной обстановки в культурно-зрелищных комплексах с учетом действующего излучения от функциональных аппаратных узлов и их использовании для обоснования способов обеспечения условий электромагнитной совместимости.

Практическое значение работы.

1. Получены количественные результаты анализа электромагнитной обстановки в реальном помещении аппаратного киноконцертного комплекса, которые могут быть использованы при проектировании новых или реконструкции существующих киноконцертных комплексов, а также служат методической базой для разработки комплекса мероприятий и практических рекомендаций, направленных на создание благоприятной электромагнитной обстановки при решении задач электромагнитной совместимости на этапе проектирования.

2. Разработанный алгоритм и программное обеспечение позволяют прогнозировать электромагнитную обстановку в функционально насыщенных помещениях киноконцертного комплекса.

3. Разработанные в диссертации методики и модели электродинамического анализа источников в помещении формируют основу для создания системы автоматизированного анализа электромагнитной обстановки в помещениях.

4. Предложены технические решения, которые позволяют обеспечить электромагнитную совместимость аудиовизуального оборудования как при локальном применении, так и в составе комплекса различных звукотехнических средств, например, в киноконцертном комплексе.

Практическая значимость результатов подтверждается:

- результатами внедрения рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости оборудования при реконструкции кинотеатра «КиноМир» г. Шахтёрск, выполненной ООО «ТехЛаб» (акт внедрения от 31.07.2023 г., утвержденный дирекцией предприятия ООО «ТехЛаб»);
- результатами внедрения в производственную деятельность ООО «ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ» при проектировании и техническом оснащении культурно-зрелищных объектов, выполненных предприятием (акт внедрения №4 от 23.04.2024 г., утвержденный генеральным директором предприятия ООО «ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ»);
- использованием в учебном процессе ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ «ШАХТЁРСКИЙ КОЛЛЕДЖ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ ИМЕНИ А.А. ХАНЖОНКОВА» при подготовке по специальностям 11.02.05 «Аудиовизуальная техника» и 55.02.01 «Театральная и аудиовизуальная техника (по видам)» (акт № 725/1 от 02.12.2024 г., утвержденный директором ГБПОУ ДНР «ШКК И ТВ ИМ. А.А. ХАНЖОНКОВА»).

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что при механических колебаниях ферромагнитных экранов электромагнитного поля при наличии постоянного магнитного поля в них из-за обратного магнитострикционного эффекта возникает переменная во времени намагниченность, которая означает, что вибрирующие ферромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры становятся источниками низкочастотного магнитного поля, то есть источниками низкочастотных помех, что необходимо учитывать при формировании математических моделей.

2. Показано, что разработанная методология расчета резонансного контура и пиковых значений тока в силовых полупроводниковых ключах позволяет упростить задачу разработки энергоэффективного усилителя класса Д уже на стадии проектирования и уменьшить коммутационные помехи в разрабатываемом усилителе. Предложенная методика позволяет значительно (на 10 – 15%) сократить время расчетов по сравнению с другими методиками за счет структурированного пошагового подхода и использования нормализованных кривых. При этом достигается высокая точность расчетов (в пределах $\pm 5\%$), что достаточно для большинства практических приложений.

Степень достоверности результатов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются достаточным уровнем адекватности разработанных моделей; сходимостью теоретических и экспериментальных результатов исследований; апробацией работы на конференциях, положительными результатами внедрения на предприятии.

Личный вклад.

Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, и вынесенные на защиту научные положения получены соискателем самостоятельно в процессе научных исследований. Личный вклад автора заключается в обосновании идеи и цели работы, её реализации, а также в проведении теоретических и экспериментальных исследований, разработке вычислительных алгоритмов и комплекса программ для их компьютерной реализации, разработке рекомендаций по практическому применению результатов.

Апробация результатов диссертации.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих научных конференциях и семинарах.

1. XXIX международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века» (12–18 сентября 2022 г., г. Севастополь).

2. 7-я Международная научно-техническая конференция «Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях» «СИТОНИ-2021» (23 ноября 2021 г., Донецк, ДНР).

3. Международная научно-техническая конференция: Автоматизация: проблемы, идеи, решения «АПИР-2014» (8–12 сентября 2014, г. Севастополь).

4. 12th International Conference: Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science «TCSET'2014» (February 25 – March 1 2014, Lviv-Slavsk).

5. I Научно-практическая конференция «Современные технологии кино» (15–16 апреля 2013 г., г. Шахтёрск.)

6. Electronics and nanotechnology proceedings of the XXXII International Scientific Conference ELNANO 2012 (10-12 April 2012, Kyiv)

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы автором самостоятельно и в соавторстве в 15 научных работах, в том числе: 2 работы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный ВАК РФ; 2 работы в изданиях, входящих в международные научометрические базы данных SCOPUS; 5 работ в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный ВАК Украины; 6 – по материалам научных конференций.

Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности.

Полученные результаты, положения и выводы отвечают требованиям паспорта специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), в частности: п.3. «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; п.6. «Разработка систем компьютерного и имитационного

моделирования, алгоритмов и методов имитационного моделирования на основе анализа математических моделей (технические науки)»; п.7. «Качественные или аналитические методы исследования математических моделей (технические науки)»; п.8. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента»; п.9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 216 страниц машинописного текста и состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 139 источников на 23 страницах и 4 приложений на 35 страницах. Основной текст, изложенный на 158 страницах, иллюстрируется 55 рисунками и содержит 14 таблиц.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ КИНОКОНЦЕРТНЫХ ЗАЛОВ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Электромагнитная совместимость как одно из основных требований к оборудованию киноконцертных залов

Задача обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств киноконцертного комплекса охватывает широкий комплекс характеристик аппаратуры. Современный киноконцертный комплекс имеет в своем составе различное функциональное оборудование: информационное (видеосерверы, роутеры и др.), радиоэлектронное (устройства для приема и передачи сигналов, радио и телевизионные тюнеры / передатчики и др.), мультимедийное (цифровые проекторы, видео мониторы и др.), звукотехническое (усилители звуковой частоты, микрофоны и др.), силовое (выпрямители ксеноновых ламп, темнители света). Применение указанного и другого оборудования, которое можно трактовать как источник, так и receptor электромагнитных помех, может вызвать сбои в работе чувствительной аппаратуры, а также ухудшить сложную электромагнитную обстановку.

На рисунке 1.1 обобщенно показаны тенденции изменения основных показателей технических средств в результате модернизации элементной базы и технологий производства электронной аппаратуры, развития информационных технологий и т.д.:

- уменьшение потерь в устройствах и аппаратуре в целом, то есть увеличение коэффициента полезного действия (КПД) – 1;
- уменьшение уровня сигнала – 2;
- снижение уровня собственных шумов – 3;
- увеличение уровня помех – 4.

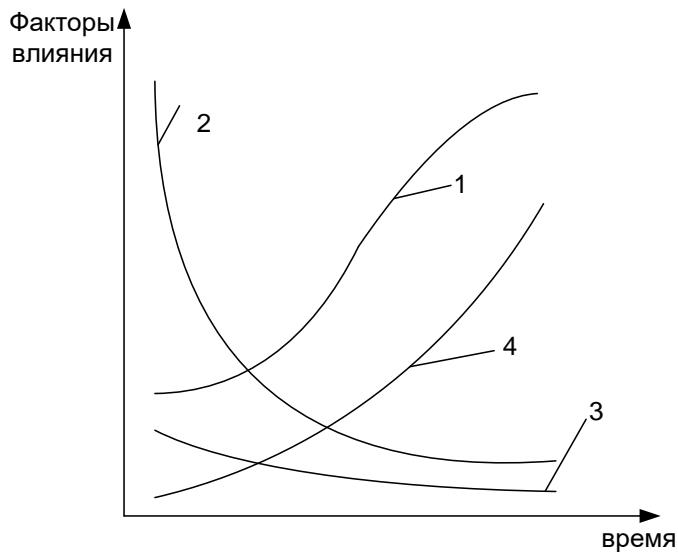


Рисунок 1.1 – Тенденции изменения параметров радиоэлектронных средств

Вследствие роста уровня электромагнитных помех, снижения интенсивности сигналов (а это означает увеличение чувствительности для сигналов и, соответственно, снижения помехоустойчивости), необходимость решения задачи обеспечения ЭМС приобретает все большую значимость.

На международной конференции Общества инженеров акустиков (AES 51st Conference, 21–24 August 2013, Helsinki, Finland) в докладе [1] подтверждена актуальность обеспечения ЭМС в профессиональном звуковом оборудовании.

Первой книгой в странах бывшего СССР, в которой описаны процессы, влияющие на обеспечение ЭМС, по цепям электропитания звукотехнического оборудования стала монография [2].

Впервые комплексный анализ киноконцертного комплекса, который служит примером сложной системы аудио-, видео-, кинотехнического оборудования, электрического, информационного, радиоэлектронного оборудования, которое совместно влияет на электромагнитную обстановку и определяет условия обеспечения взаимной ЭМС приведены в [3, 4, 5].

Результаты прямых измерений, выполненные в работе [4, с. 8] подтверждают сложную электромагнитную обстановку в помещениях аппаратных киноконцертного комплекса, сформированную оборудованием в составе киноконцертного комплекса.

В обобщенном виде пути распространения и последствия воздействия ЭМП на технологическое оборудование представлены на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Пути распространения и последствия влияния ЭМП на технологическое оборудование

Киноконцертный комплекс представляет собой сложную систему взаимовлияющего в аспекте обеспечения электромагнитной совместимости оборудования. Обобщенная функциональная схема оборудования мультиплекса представлена на рисунке 1.3 [3, с. 117].

Актуальность исследования электромагнитной обстановки обусловлена увеличением и плотным расположением радиоэлектронных средств различного назначения, а также, что очень важно, ростом чувствительности аппаратуры. Первый фактор обуславливает сложность ЭМО вследствие большого количества источников непреднамеренных помех, а второй обуславливает незащищенность рецепторов.

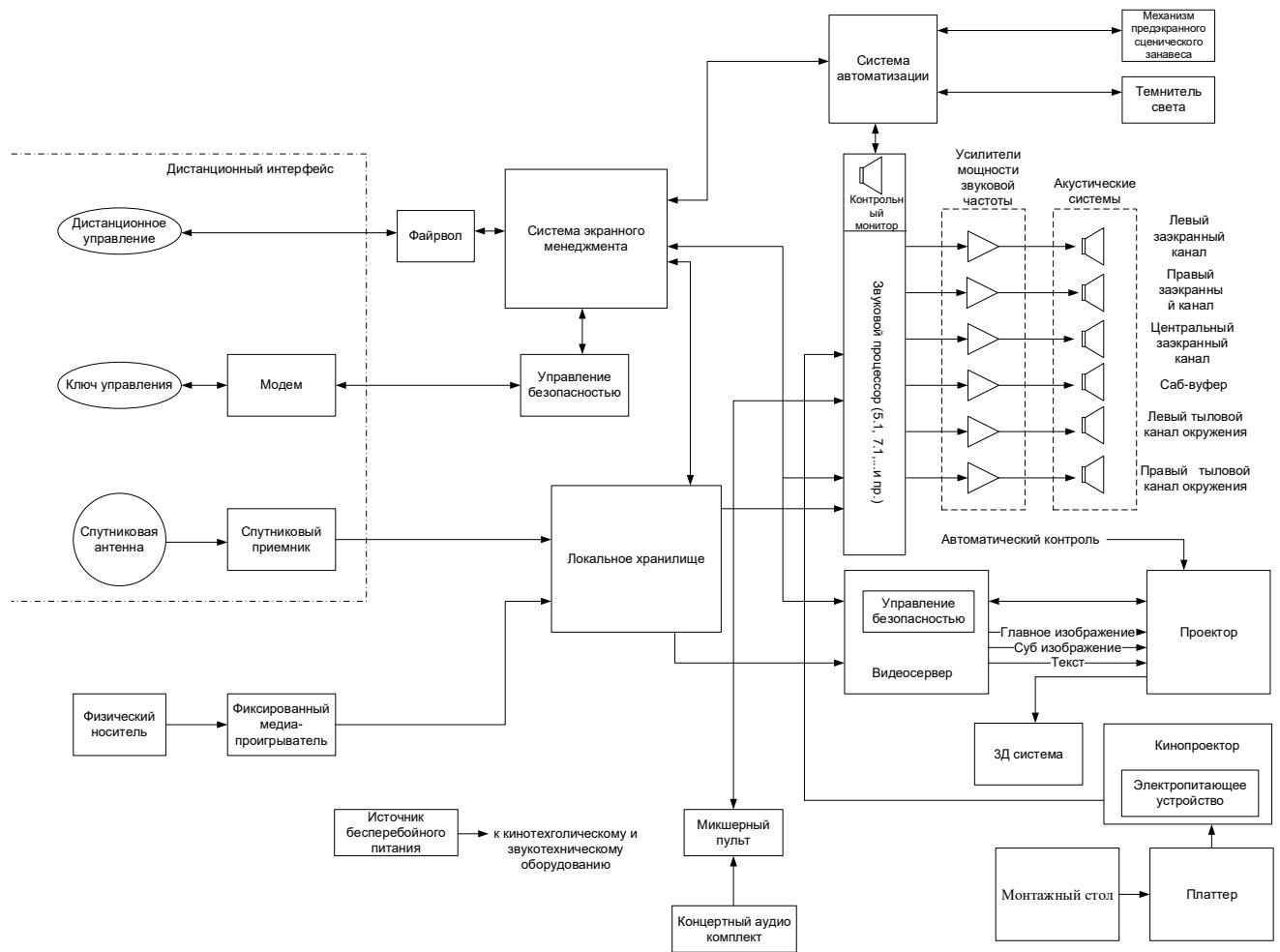


Рисунок 1.3 – Схема оборудования киноконцертного комплекса

Источники помех: силовое оборудование, блоки поджига ксеноновых ламп, платтер (система бесперемоточной демонстрации фильмов), темнитель света, диммерная система, импульсные источники света, прожекторы и светильники, лазерные системы, генераторы специальных эффектов, вспомогательная операторская техника (гиростабилизирующие системы, электромеханические тележки и платформы и т.п.), радиопередатчики, телевизионная техника, лебедка занавеса, магнитные контакторы, вентиляторы, реле, кабели силовые и др.

Рецепторы помех: процессоры обработки сигналов, звукочитающий блок кинопроектора, системные контроллеры и кроссоверы, микшерные пульты и консоли, усилители, микрофоны, радиомикрофоны, микрофонные

предусилители, портативные приемопередатчики, применяемые эксплуатационным персоналом и службами безопасности, микшерные пульты и консоли, эквалайзеры, устройства записи и воспроизведения, контрольные мониторы, система автоматизации, кабели управления, сигнальные видео и аудио кабели и др.

Восприимчивость звукотехнического оборудования в составе киноконцертного комплекса выше, чем другого кинотехнологического оборудования, в частности:

- низкого аналогового уровня сигнала (< 10 мВ);
- высокого коэффициента усиления (> 60 дБ);
- отношения сигнал/шум (> 100 дБ);
- длины сигнальных кабелей (> 30 м);
- и др.

Для питания электроакустического и кинотехнического оборудования в настоящее время применяют полупроводниковые выпрямители и источники вторичного электропитания (ИВЭП) импульсного типа (ИТ), оперирующие крутыми фронтами рабочих импульсов напряжения и тока в силовых цепях. Помехи, генерируемые ИВЭП ИТ, характеризуются высоким уровнем 70...120 дБ (в отдельных случаях до 140 дБ) относительно 1 мкВ, 1 мкВ/м, а также широким частотным диапазоном: до десятков, сотен мегагерц в кондуктивной среде, до единиц гигагерц – в окружающей среде. Высокочастотные помехи, генерируются также дискретные устройства системной платы видеосервера, цифрового проектора с частотами, кратными тактовым частотам таких узлов, как: центральный процессор, видеопроцессор, модули памяти и их составных частей: ядро, кэш и др. Источником электромагнитных помех выступают также звуковые усилители класса D, работающие в ключевом режиме [6].

Причины возникновения помех в узлах и устройствах киноконцертного комплекса различные: периодическая импульсная или переменная нагрузка; нестационарные коммутационные режимы (включение, выключение, короткое замыкание и т.д.); коммутационные переходные процессы, возникающие при

переключении транзисторов преобразователей, диодов высокочастотного выпрямителя и др. элементов; гармонические составляющие выпрямленного напряжения (тока), приводящие к искажению формы напряжения питающей сети и возникновению гармонических составляющих; наводки от внешних электромагнитных полей и др. факторы и явления.

Среди узлов и устройств киноконцертного комплекса, являющихся источниками электромагнитных помех, необходимо выделить в первую очередь источники вторичного электропитания (ИВЭП), а также электрооборудование и электромеханические устройства, имеющие в своем составе трансформаторы, электромеханические пускатели и реле, преобразовательные агрегаты с регуляторами и корректорами напряжения, выпрямительные и преобразующие узлы с емкостной, индуктивной и смешанной нагрузкой.

В процессе монтажа и эксплуатации чувствительных звукотехнических, кинотехнологических устройств, а также информационных и мультимедийных систем потенциальную опасность в аспекте обеспечения ЭМС представляют:

- помехи, создаваемые промышленным оборудованием, в зависимости от частотного диапазона, оказывают влияние на целый комплекс устройств в составе киноконцертного комплекса, вызывая технические сбои и аппаратные отказы. Например, низкочастотные ЭМПоля электросиловых цепей и оборудования, способны стать причиной возникновения искажений изображения на дисплеях мониторов;

- коммутационные переключения, перенапряжения и аварии в системе электроснабжения могут вызвать аппаратные отказы по линии электроснабжения, что, в свою очередь, может привести к повреждению компонентов источника бесперебойного питания, который является обязательной частью современной цифровой киноустановки.

- электростатические разряды (ЭСР) часто приводят к техническим сбоям в чувствительном информационном и мультимедийном оборудовании (зафиксированы случаи повреждения: портов USB, RS-232; модулей RAM

памяти; компонентов на материнской плате, таких как чипы управления питанием, контроллеры интерфейсов и пр.);

– импульсные помехи в диапазоне от 1 ГГц и выше, возникающие при эксплуатации электромеханических устройств, таких как реле, коммутационные аппараты, щеточные двигатели и пр., могут вызывать технические сбои в работе чувствительной цифровой техники. Зафиксированы случаи повреждения контроллеров SCSI/RAID из-за воздействия данных помех;

– воздействие высокочастотных электромагнитных полей, возникающих при работе радиотехнических устройств, может привести к сбоям в информационных системах (в т.ч. в аудиовизуальных системах, например в работе видеоконференцсвязи, мультимедийной презентационной системы).

Широкое распространение в свое время получили электромагнитные выпрямители для питания ксеноновых ламп, выполненные на ферромагнитных элементах – дросселях насыщения или магнитных усилителях.

В настоящее время в киносети активно используют выпрямители для питания ксеноновых ламп мощностью от 250 до 10000 Вт и токами до 300 А. Электропитающее устройство для питания ксеноновых ламп характеризуется помехами в широкой полосе с разными уровнями и спектральным составом.

В блоке питания ксеноновой лампы для поджига используется высокочастотный источник импульсного высокого напряжения, для подпитки – маломощный источник постоянного тока – выпрямитель и для работы в нормальном режиме мощный стабилизированный выпрямитель. Блок поджига ксеноновой лампы – это высокочастотный, высоковольтный источник, который создает пакеты импульсов частотой 1 МГц и напряжением 30 кВ. Ксеноновая лампа, используемая в качестве источника света, также является интенсивным источником помех с широкополосным спектром.

Электромагнитные помехи распространяются от источника помех к приемнику двумя способами – кондуктивным (проводы, шасси и корпуса устройств, шины заземления, экраны, оплётку и проч.) и через окружающее пространство.

Помехи могут проникать через ИВЭП и общий заземляющий контур кондуктивным способом по цепям электропитания. Например, высокочастотные помехи первичной сети проникают на выход ИВЭП через паразитные межобмоточные емкости разделительных трансформаторов, межвитковые емкости дросселей фильтров, соединительные провода. По этим цепям и заземляющему контуру также циркулируют токи от ключевых каскадов, которые создают импульсные помехи на входе и выходе ИВЭП [4, с.4].

Помехи, создаваемые токопроводящими цепями импульсных источников питания видеосерверов, источниками бесперебойного питания и мониторами, излучаются непосредственно в окружающую среду и могут достигать в некоторых случаях до 120 дБмкВ/м.

Атмосферные и космические процессы – это следствие естественных процессов, происходящих в природе: грозовых разрядов, солнечной радиации, космических излучений, магнитных бурь. Наиболее существенные помехи могут возникать при грозовых разрядах, так как молния создает сильное электромагнитное поле (ЭМПоле), приводящее к значительному изменению напряжения в линиях электропередачи при нарушении их изоляции.

Электромагнитное поле, создаваемое видеосерверами в аппаратной и сервером в соседнем офисном помещении, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от десятков герц до гигагерц.

Отдельные провода, кабели и жгуты проводов, соединяющие различное оборудование, могут выступать в качестве источников излучения ближних и дальних электромагнитных полей. Следовательно, кабельная сеть также должна приниматься во внимание при оценке электромагнитной обстановки [7].

Существенные помехи могут возникать при грозовых разрядах, так как молния создает сильное электромагнитное поле, приводящее к значительному изменению напряжения в линиях электропередачи при нарушении их изоляции.

Результаты воздействия помех могут привести к выходу из строя или вызвать сбои в работе ИВЭП, кинотехнического оборудования и других технических средств (ТС) в составе киноконцертного комплекса.

В киноаппаратной размещено и другое силовое оборудование: главные распределительные щиты, вводно-распределительные устройства, щиты и щитки питания: освещения, противопожарных устройств, систем диспетчеризации и проч. Особого внимания требует проверка уровней напряженности поля в местах:

- непосредственной близости от шин (кабелей) питания 220 (380) В, 50 Гц;
- подключения оборудования к сети электропитания 220 (380) В, 50 Гц.

Несмотря на высокие несущие частоты для большинства современных систем связи, наличие низкочастотных всплесков при модуляции оказывает влияние на низкочастотные входы. Самый известный пример – шум GSM, наведенный на линейном и микрофонном входах из-за всплесков TDMA 217 Гц.

Формирование ЭМО радиоэлектронной аппаратурой рассмотрено во многих работах, например [8, 9, 10, 11], однако существует еще неявный источник электромагнитных помех в аппаратно – насыщенных помещениях, по которым информации недостаточно и которые представляют интерес. Это металлические элементы конструкций радиоэлектронной аппаратуры, которые совершают механические колебания (вибрируют) при наличии постоянного и/или низкочастотного магнитного поля. Одна из первых работ, в которой проанализированы электроакустические причины формирования электромагнитных помех, представлена на XIX Международном ЭМС-симпозиуме в городе Вроцлав (Республика Польша) [12].

Для проведения корректного анализа процессов, связанных с определением условий обеспечения ЭМС функциональных узлов и устройств необходимо составить матрицу источников и рецепторов помех конкретного объекта. Фрагмент такой матрицы представлен в таблице 1.1, где многоточие свидетельствует о возможности включения в матрицу других устройств.

В таблице 1.1 использованы следующие обозначения.

Группа А – мультимедийное оборудование: А1 – цифровой проектор, А2 – видеосервер, А3 – звуковой процессор, А4 – усилители мощности звуковой

частоты (класс АВ), А5 – усилители мощности звуковой частоты (класс Д), А6 – система автоматики и т. д.

Группа В – электросиловое оборудование: В1 – источники бесперебойного питания, В2 – электронные пускатели, В3 – преобразователи, В4 – трансформаторы, В5 – диммеры света и т. д.

Группа С – беспроводные средства связи: С1 – Wi-Fi роутеры, С2 – Bluetooth передатчики, С3 – беспроводные микрофоны, С4 – мобильные телефоны, С5 – ИК-передатчики и т. д.

Таблица 1.1 – Матрица источников и рецепторов помех конкретного объекта

Группы оборудования		Виды оборудования	Свойства	Источники и рецепторы помех			
				A1A2A3A4A5A6	B1B2B3B4B5	C1C2C3C4C5	D1D2...
A	Мультимедийное оборудование	A1-Цифровой проектор A2-Видеосервер A3-Звуковой процессор A4 – Усилители мощности звуковой частоты (класс АВ) A5 – Усилители мощности звуковой частоты (класс Д) A6-Система автоматики	- созд. пом. - воспр. - очень воспр. - очень воспр. - созд. пом. - воспр.				
B	Электросиловое оборудование	B1-Источники бесперебойного питания B2-Электронные пускатели B3-Преобразователи B4-Трансформаторы B5-Диммеры света	- созд. пом. - созд. пом. - созд. пом. - невоспр. - созд. пом.				
C	Беспроводные средства связи	C1-Wi-fi передатчики C2-Bluetooth передатчики C3-Беспроводный микрофон C4-Мобильный телефон C5-ИК передатчики	- созд. пом. - созд. пом. - созд. пом. - созд. пом. - невоспр.				
D				

Процедуру анализа электромагнитной обстановки целесообразно выполнять по алгоритму, представленному блок – схемой на рисунке 1.4. Алгоритм повзимствован из [13].

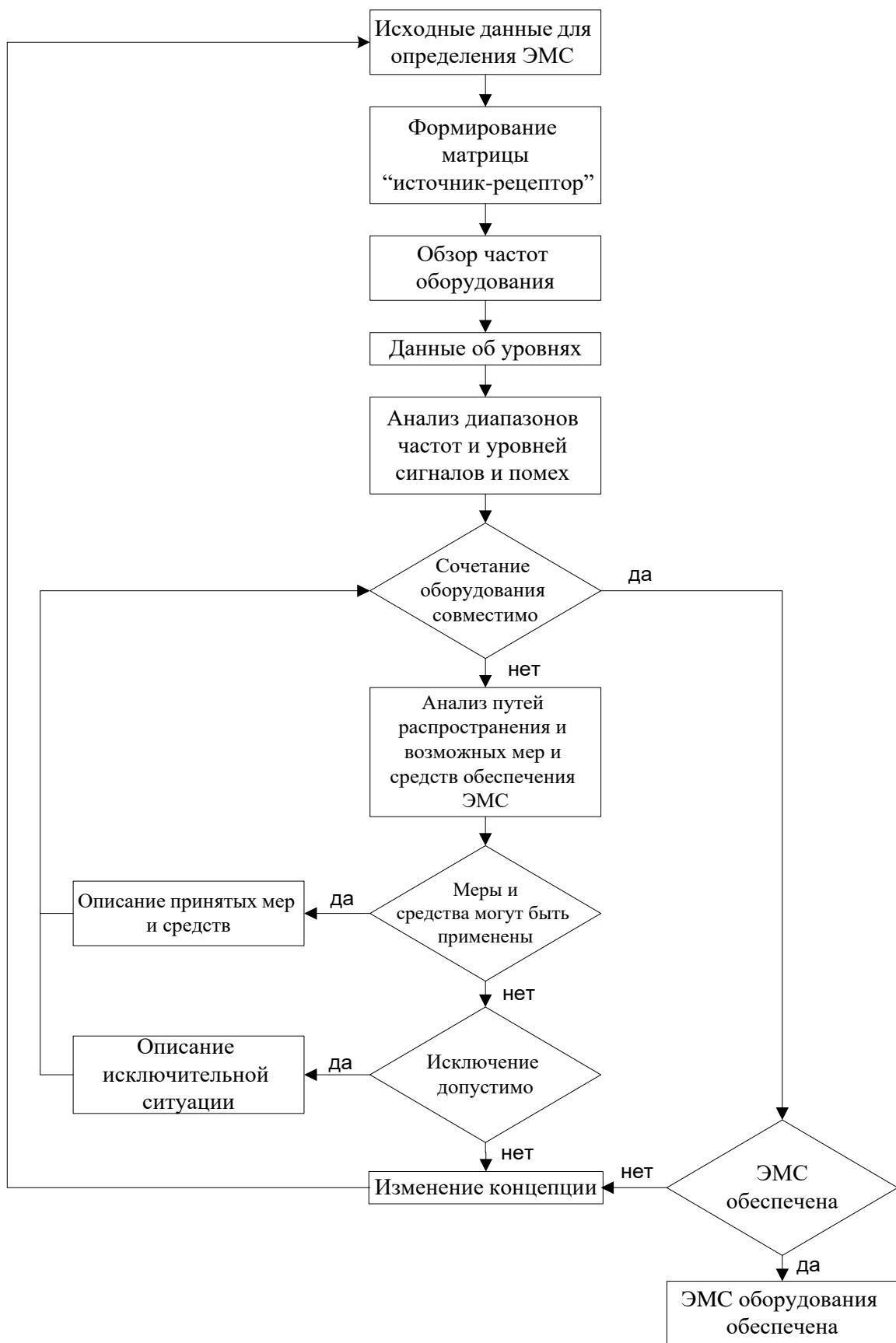


Рисунок 1.4 – Блок-схема алгоритма анализа ЭМС

Важнейший вопрос, связанный с обеспечением ЭМС любых систем, состоит в возможности прогнозирования электромагнитной обстановки, т. к. только в этом случае принятые технические решения будут наиболее рациональными как при построении функциональной части объекта, так и в применении помехоподавляющих средств. Этим вопросам посвящены, в частности, работы [14, 15].

Для корректного заполнения матрицы «источник помех – рецептор помех» необходимо определить уровни излучения от источников электромагнитных помех, уровни невосприимчивости, сопоставить их с соответствующими нормами и необходимыми запасами по невосприимчивости и электромагнитной совместимости. Предложенный алгоритм анализа следует дополнить блоками, которые обеспечат рациональный выбор помехоподавляющих средств.

На основе полученных данных об используемых диапазонах частот и уровнях возмущений для предварительного анализа целесообразно представить в наглядном виде уровни эмиссии и восприимчивости. Качественный пример результатов такого анализа представлен в п.1.2.1 и п.1.2.2.

1.2 Сравнительный анализ допустимых уровней эмиссии и чувствительности кинотехнологического оборудования

Проблеме обеспечения ЭМС достаточно давно уделяется внимание, в частности, в таблице 1.2 приведен допустимый уровень радиопомех, которые создают кинопроекторы, электропроигрыватели и магнитофоны (Общесоюзные нормы допускаемых индустриальных радиопомех – Нормы 1–72 – 9–72 [16]).

В рамках регулирования ЭМС разработана обширная нормативная база в т.ч. различные стандарты и международные законодательные акты, которые ограничивают уровни излучения различных видов ЭМП. Доустимые уровни ЭМП регламентированы комплексом стандартов на международном, региональном и государственном уровнях. Региональные нормативные документы в сфере ЭМС включены в набор стандартов, предложенных в

Директиве 2014/30/EU ЭМС Европейского Парламента и Совета Европейского Союза [17]. В качестве примера также можно привести 15 раздел Федеральной комиссии связи США (Federal Communications Commission – FCC).

Таблица 1.2 – Допустимый уровень радиопомех, согласно: общесоюзных норм допускаемых индустриальных радиопомех (Нормы 1–72-9–72)

Диапазон частот, МГц	Допускаемый уровень			
	Напряжение радиопомех на сетевых зажимах		Напряженность поля радиопомех на расстоянии 3 м	
	мкВ	дБ	мкВ/м	дБ
От 0,15 до 0,5	1000	60	–	–
Свыше 0,5 до 2,5	400	52	200	46
Свыше 2,5 до 30	400	52	200	46
Свыше 30 до 300	400	52	64.....200 ¹	36....46

¹ Свыше 30 МГц – 64 мкВ/м, при 300 МГц – 200 мкВ/м, возрастание линейное

Проблему обеспечения ЭМС определяют два аспекта: эмиссия и восприимчивость. Следовательно, и стандарты структурированы по этим двум видам: устанавливающих требования к испытаниям к восприимчивости (невосприимчивости), то есть связанные с чувствительностью аппаратуры (к сигналам) или восприимчивостью (к помехам), а также процедуры, связанные с допустимыми уровнями эмиссии в средах: кондуктивной и – в окружающей среде.

В таблице 1.3 приведены международные, европейские и государственные стандарты на основные виды испытаний электроакустического, телекоммуникационного, осветительного оборудования и др., применяемого, в частности, в киноконцертном комплексе по параметрам, характеризующим условия обеспечения ЭМС [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35].

Таблица 1.3 – Нормативные документы по обеспечению ЭМС на оборудование, применяемое в киноконцертном комплексе

Основная номенклатура продукции	Стандарты, обеспечивающие выполнение требований ЭМС	
	эмиссия	восприимчивость
1. Профессиональная аудио, видео-, аудиовизуальная аппаратура и аппаратура управления световыми приборами для зрелищных мероприятий	EN 55103-1:2009 ГОСТ EN 55103-1-2013	EN 55103-2:2009 ГОСТ EN 55103-2-2016 ГОСТ 32136-2013
2. Оборудование для информационных технологий	EN 55022:2010 CISPR 22:2006 ГОСТ 30805.22-2013	EN 55024:1998 + А1 + А2 ГОСТ CISPR 24-2013
3. Оборудование мультимедиа	EN 55032:2012 CISPR 32:2012 ГОСТ CISPR 32-2015	ГОСТ CISPR 35-2019
4. Радиоэлектронная бытовая аппаратура (телеизионные приемники, звуковая аппаратура)	EN 55013:2013 CISPR 13:2006 ГОСТ 30805.13-2013	EN 55020:2007 ГОСТ Р 51318.20-2012
5. Светотехническая продукция	EN 55015:2013 ГОСТ CISPR 15-2014	EN 61547:2009 ГОСТ Р 51514-2013
6. Системы бесперебойного питания		IEC 62040-1-1:2002 ГОСТ Р МЭК 62040-1-1-2009
7. Беспроводные средства связи (Wi-Fi, Bluetooth и т.п.)		ETSI EN 300 328 V1.7.1: 2006 ETSI EN 301 489-1 V1.8.1:2008 ГОСТ EN 301 489-1 V1.9.2-2015 ETSI EN 301 489-17 V2.1.1:2009 ГОСТ Р 52459.17-2009
8. Оборудование, попадающее под действие Директивы по ЭМС 2004/108/ЕС, но на которое нет конкретного документа, и применяют общие (родовые, Generic) стандарты	IEC 61000-6-3:2011 ГОСТ IEC 61000-6-3-2016 IEC 61000-6-4:2011 ГОСТ IEC 61000-6-4-2016	IEC 61000-6-1:2016 IEC 61000-6-2:2016 ГОСТ 30804.6.1-2013 ГОСТ 30804.6.2-2013

1.2.1 Сравнение регламентированных уровней помех и чувствительности по полю

Важный этап анализа состоит в выявлении полос частот и чувствительности (восприимчивости) оборудования, используемого в киноконцертном комплексе и сравнении с действующими нормами, распространяющимися на данное оборудование.

Усредненные данные о чувствительности к радиосигналам некоторых приемников приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Характеристики радиооборудования по полю

№ ПП	Тип оборудования	Диапазон частот	Чувствительность дБ(мкВ/м)
1	Беспроводный микрофон	(470...862) МГц (220...270) МГц	24 14
2	Bluetooth устройство	(2,4...2,4835) ГГц	52
3	Мобильный телефон GSM	(824...849) МГц	33
4	Wi-Fi роутер (802.11a,b,g,n)	(2,412...2,484) ГГц (5,170...5,620) ГГц	58 65
5	Аппаратура цифрового телевидения DVB-T2	III: (174...230) МГц IV/V: (470...862) МГц	27 45
6	WiMax	802.16d: (1,5...11) ГГц 802.16e: (2,3...13,6) ГГц	55
7	FM стерео радиоприемник “КТ0830Е”	(64...109) МГц	7

Результаты сравнения данных о допустимых уровнях помех в окружающем пространстве для измерения квазипиковым детектором (на расстоянии 3 м от непреднамеренного источника помехи) и чувствительности (в данном случае – восприимчивости) представлены на рисунке 1.5, где обозначены кривые норм эмиссии, причем требования норм, указанные в соответствующих стандартах в диапазоне частот от 30 МГц до 6 ГГц, совпадают. Позиции, отмеченные цифрами 1...7 на рисунке 1.5, соответствуют позициям 1...7 в таблице 1.4.

Подробный анализ о сравнении допустимых уровней, указанных в нормативных документах приведены в работе соискателя [36].

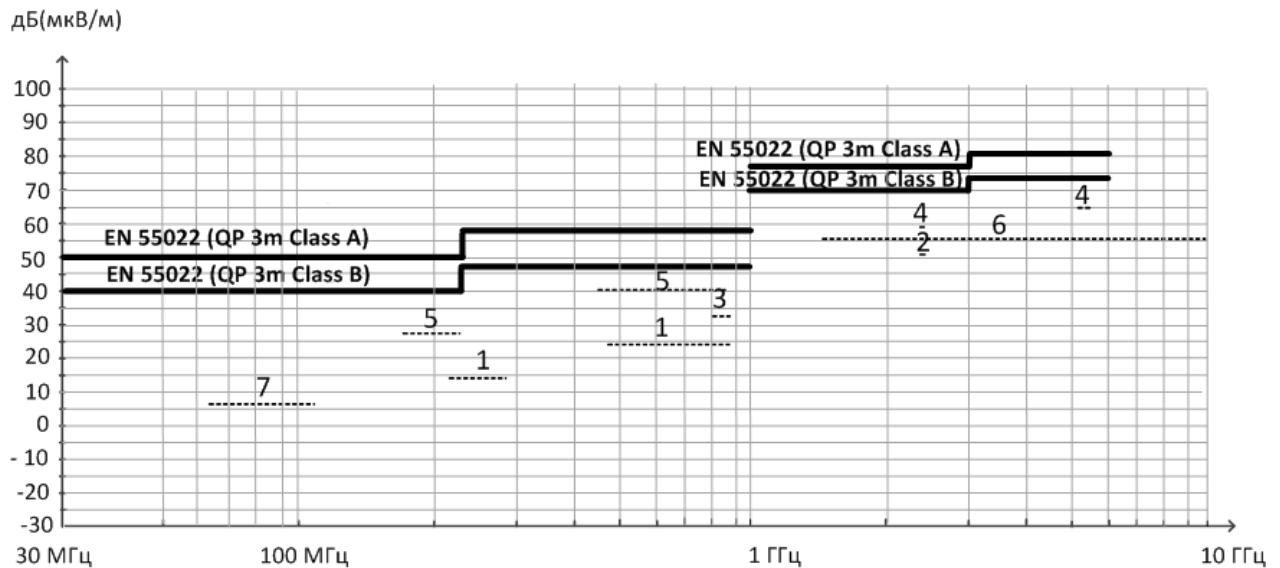


Рисунок 1.5 – Допустимые уровни помех в окружающем пространстве и данные чувствительности аппаратуры

Таким образом, показано, что на расстоянии 3 м допустимые уровни эмиссии в окружающем пространстве значительно превышают уровни восприимчивости аппаратуры, размещенной в киноконцертном комплексе.

Это указывает на то, что при проектировании таких объектов инженеру необходимо ответственно подходить к выбору оборудования, используемого в киноконцертном комплексе, и учитывать электромагнитную составляющую при проектировании, т.к. источник непреднамеренных помех может оказывать воздействие на чувствительный receptor.

1.2.2 Сравнение регламентированных уровней помех и чувствительности в кондуктивной среде

Распространение кондуктивных помех к receptorам чувствительной аппаратуры происходит по симметричному и несимметричному путям. Вопрос о прохождении кондуктивных помех на вход чувствительной аппаратуры достаточно сложный, так как требует должного контроля за распространением помех по несимметричным (практически неконтролируемым) путям.

Уровень помехи, попадающей на вход, например, усилителя звуковой частоты, можно определить по методике, изложенной, например, в [37].

Следует отметить, что в регламентирующих документах уровень эмиссии может быть нормирован значением общего напряжения в децибелах относительно 1 мкВ (дБ/мкВ), но и тока в децибелах относительно 1 мкА (дБ/мкА).

Для вещательных приемников, в зависимости от типа, значения номинальной чувствительности в диапазоне от 30 до 300 кГц (НЧ) и от 300 до 3000 кГц (СЧ) – в пределах (50...300) мкВ; в диапазоне от 3 до 30 МГц (ВЧ) – (50...200) мкВ; в диапазоне от 30 до 300 МГц (ОВЧ) и от 300 до 3000 МГц (УВЧ) – (0,5...30) мкВ. Телевизионные приемники, согласно паспортным данным, имеют чувствительность (32...43) дБмкВ (40...140) мкВ. Чувствительность усилителей мощности звуковой частоты по микрофонному входу составляет 0,5 мВ; линейному входу – 3 мВ.

Усредненные данные о чувствительности некоторых устройств, используемых в киноконцертном комплексе, по кондуктивным цепям приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Характеристики оборудования по кондуктивным цепям

№ ПП	Тип оборудования	Диапазон частот	Чувствительность дБ(мкВ)
1	2	3	4
1	Аппаратура с ВЧ-модулятором (видеомагнитофон, видеокамера и т.д.)	(49,75...229,75) МГц (476,75... 867,25) МГц	39
2.1	Усилитель мощности звуковой частоты: – микрофонный вход	(10...25000) Гц	54
	– линейный вход		69,5
3	Чувствительность приёмного тракта радиоресивера	AM: 522...1611 кГц FM: 87,5...108,0 МГц	25 6
4	Гитарная радиосистема “Audio-technica ATW-701/G”	(800...820) МГц (840...865) МГц	25
5	Цифровой ресивер “Elgreen DVT2-5500 HD” (DVB-T/DVB-T2)	(170...230) МГц (470...862) МГц	27

Продолжение таблицы 1.5

1	2	3	4
6	Демодулятор “DMT-017” (прием сигнала в форматах DVB-T/T2/C и преобразование его в аналоговый ТВ-канал)	(110...858) МГц	18
7	Спутниковые модули / конвертер	(950...2150) МГц	45
8	Телевизионные приемники	(30...300) МГц (300...1000) МГц	32 37

Оборудование, согласно регламентирующим документам, подразделяют на два класса: 1. Класс А (промышленная среда); 2. Класс В (бытовая среда). Значительное количество оборудования аппаратной киноконцертного комплекса (цифровые проекторы, источники бесперебойного питания и т.д.) принадлежит классу А, что требует дополнительных мер обеспечения ЭМС, т.к. нормы, указанные для оборудования класса В, приблизительно на 10 дБ более жесткие, чем для класса А.

На рисунке 1.6 представлены допустимые уровни эмиссии в кондуктивной среде для оборудования класса В (детектор квазипиковый (QP) и чувствительности (в данном случае применительно к помехам – восприимчивости). Нормы, приведенные в стандартах [38, 39, 40] совпадают для диапазона частот (0,15...30) МГц. Позиции, отмеченные цифрами 1...8 на рисунке 1.6, соответствуют позициям 1...8 таблицы 1.5.

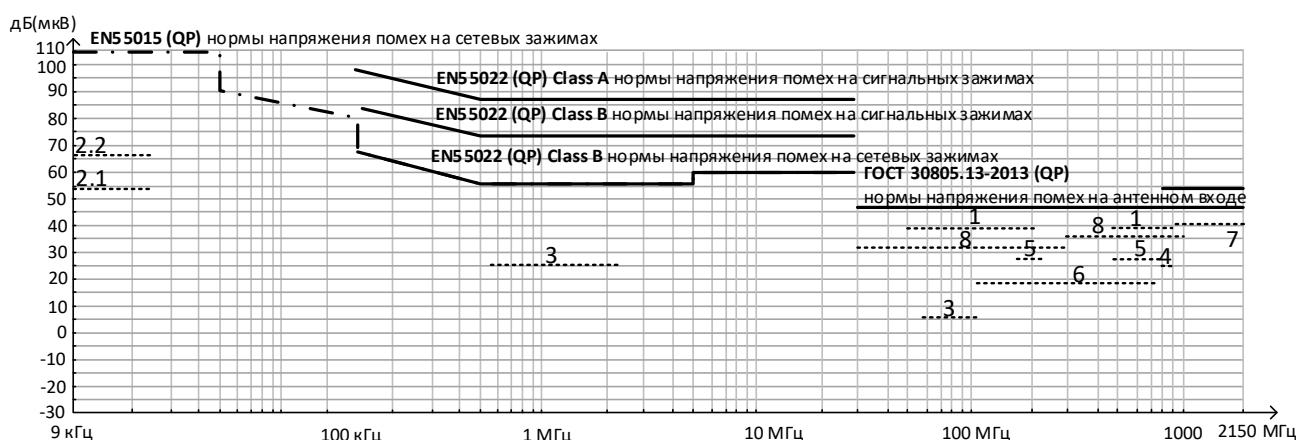


Рисунок. 1.6 – Допустимые уровни помех в кондуктивной среде и данные чувствительности

Таким образом, как следует из приведенных данных, уровни допустимой нормативными документами кондуктивной эмиссии также превышают чувствительность радиоэлектронного и, в частности, звуко- и кинотехнологического оборудования.

Результаты анализа свидетельствуют, что чувствительная аппаратура в кондуктивной среде подвержена воздействию непреднамеренных источников помех, в т.ч. и сертифицированной аппаратуры. Поэтому перед инженерами-проектировщиками стоит задача использования всего имеющегося арсенала, не только инженерных средств, но и административно-организационных. Важным этапом при решении задач обеспечения ЭМС в киноконцертном комплексе будет составление матрицы «источник помехи – receptor помехи», где будут выделены соответствующие группы оборудования, оказывающие влияние в аспектах обеспечения ЭМС.

1.3 Цель и задачи исследования

В результате анализа литературных источников и проблематики вопроса сформулированы цели и задачи работы.

Цель – совершенствование методов и средств обеспечения электромагнитной совместимости оборудования в культурно-зрелищных объектах путем обоснования рациональных параметров аппаратуры, создающей электромагнитное поле, за счет применения математического моделирования процессов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи.

1. Анализ уровней кондуктивных помех и помех в окружающем пространстве для сравнения с допустимыми значениями, приведенными в регламентируемых документах, и чувствительностью электронной аппаратуры.

2. Математическое моделирование процессов, при которых возникают электромагнитные помехи в проводящей (кондуктивной) среде и окружающем пространстве.

3. Определение конкретных параметров влияния помех от различных источников и пути их распространения с оценкой восприимчивости рецепторов к воздействию конкретных помех.

4. Систематизация сведений о технических средствах, являющихся источниками и рецепторами электромагнитных помех в помещениях киноконцертного комплекса, определение возможных факторов возникновения электромагнитных помех, путей их распространения и создания матрицы «источник помех – рецептор помех».

5. Разработка алгоритмов комплексного анализа электромагнитной обстановки в помещениях киноконцертного комплекса.

6. Разработка программных средств прогнозирования и выбора способа обеспечения электромагнитной совместимости на этапе проектирования киноконцертного комплекса и электроакустической аппаратуры.

7. Исследование электромагнитной обстановки современного киноконцертного комплекса, разработка рекомендаций по рациональному выбору и размещению оборудования, мероприятий и средств снижения помех в киноконцертном комплексе, защиты технических средств в аспекте электромагнитной совместимости.

1.4 Выводы

1. Показано, что до настоящего времени не выполнены работы по комплексному исследованию электромагнитной обстановки, вызванной источниками помех в кондуктивных цепях и в окружающей среде, созданию условий прогнозирования уровней и полос частот электромагнитных помех и рациональному выбору средств и мероприятий обеспечения электромагнитной совместимости киноконцертного оборудования с другой электронной аппаратурой и электрической сетью.

2. В результате анализа уровня помех в кондуктивной среде и в окружающем пространстве, а также сравнения с допустимыми значениями, приведенными в регламентируемых документах, и чувствительностью электронной аппаратуры, установлено, что обоснование методов и средств обеспечения электромагнитной совместимости с применением математического моделирования и системного анализа является актуальной научно-технической задачей, имеющей отраслевое значение.

3. Уровни порога чувствительности современной информационной, звукотехнической и другой радиоэлектронной аппаратуры существенно ниже допустимых стандартных уровней, поэтому соблюдение действующих норм не гарантирует условия обеспечения ЭМС, особенно в помещениях, насыщенных функциональной аппаратурой, которая может проявлять себя и как источник помех, и как рецептор. Произведен сравнительный анализ допустимых уровней помех и чувствительности радиоэлектронной аппаратуры в составе киноконцертного комплекса. Показано, что допустимые уровни помех могут значительно превышать чувствительность аппаратуры.

4. В основу обеспечения ЭМС на уровне киноконцертного комплекса должен быть положен системный подход, который включает: определение характеристик устройств; описание и анализ связей; систематизацию и организацию системы в целом, что предполагает изучение сложной электромагнитной обстановки, рациональный выбор, размещение и при необходимости, применение дополнительных технических средств обеспечения ЭМС (экранирование, фильтрация, заземление и т.д.).

5. Сформулированы цель и задачи исследования.

РАЗДЕЛ 2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С УЧЁТОМ

ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

2.1 Источники и типы механических возмущений, влияющих на электромагнитное поле

Рассматриваемые в подразделе вопросы опубликованы в научной работе соискателя [41].

Особенности расчета переменного магнитного поля, создаваемого вибрирующим ферромагнитным стержнем и диском описаны в работах [42, 43, 44, 45].

Практика доказывает, что в помещениях, оборудованных различной радиоэлектронной аппаратурой, кроме электромагнитных полей, обусловленных полосами рабочих частот, выявлено наличие низкочастотных электромагнитных помех звукового частотного диапазона [46, 47, 48].

Электромагнитные помехи низкочастотного диапазона генерируют непреднамеренные источники в составе комплекса радиоэлектронной аппаратуры. Такими источниками низкочастотных электромагнитных помех могут быть металлические элементы конструкции радиоэлектронной аппаратуры, шкафы с электрическим оборудованием, вентиляционные каналы, кабели, которые вследствие механических возмущений совершают колебания (вибрируют) при наличии в окружающей среде постоянного магнитного поля. Также источниками механических колебаний в аппаратной киноконцертного комплекса являются: приточно-вытяжная вентиляционная система, связанная с проектором и расположена в аппаратной; работа механических вращающихся компонентов аппаратуры: обтюратора, цветового диска; лентопротяжного тракта, электродвигателей (плоттера, перемоточного стола, кинопроектора, активных систем охлаждения).

Вибрации возникают также в результате: работы акустических систем

(например, плохо закрепленных элементов), шума и вибрации трансформаторов вследствие физического явления – магнитострикции; неправильного центрирования электродвигателя с рабочим механизмом; неисправностей в соединительной муфте; искривления вала; неуравновешенности вращающихся частей электродвигателя или рабочего механизма; ослабления крепления или посадки вращающихся частей; эксцентрикитета индуктора и якоря или изменения формы расточки якоря или индуктора; неправильно выполненных соединений отдельных частей или фаз обмоток; недостаточной жесткости корпуса статора, в результате чего активную часть якоря притягивают полюса индуктора с вибрацией; замыкания различного вида в обмотках электродвигателей; обрывы одной или нескольких параллельных ветвей обмоток; неравномерный воздушный зазор между статором и ротором и прочее [49].

Источником постоянного магнитного поля выступает постоянный ток больших значений в выпрямителях, питающих источники света. Итак, постоянное магнитное поле создают: оборудование, которое содержит дроссели насыщения – темнитель света; выпрямитель; электродвигатель постоянного тока – механизм заэкранного сценического занавеса, платтер. Также источниками НЧ магнитных полей могут быть электросиловые линии, которые коммутируют кинотехнологическое оборудование.

В современных условиях повышения чувствительности, улучшения других качественных показателей и расширения функций радиоэлектронной аппаратуры различного назначения – актуальность обеспечения электромагнитной совместимости ЭМС постоянно растет. Этот тезис справедлив и для современного многозального цифрового киноконцертного комплекса, оснащенного разнообразной функциональной аппаратурой с высокой чувствительностью, работающей в диапазонах частот от звуковых до гигагерцовых.

Вопросы формирования электромагнитной обстановки (ЭМО) «традиционными» устройствами – непреднамеренными источниками

электромагнитных помех (ЭМП): звукотехнической аппаратурой, источниками энергоснабжения, информационными и управляющими устройствами и др. рассмотрено в работах отечественных и зарубежных специалистов. Однако недостаточно внимания уделено специфическим для киноконцертного комплекса источников низкочастотных ЭМП звукового и ультразвукового диапазонов, обусловленных электромеханическими факторами. Низкочастотные электромагнитные помехи различного уровня могут быть также в аппаратурных отсеках авиа и космической техники, в серверных, офисах и других помещениях. Эти электромагнитные помехи килогерцового частотного диапазона неумышленно формируют источники в составе механического оборудования киноконцертного комплекса. Источниками низкочастотных электромагнитных помех могут быть металлические элементы радиоэлектронной аппаратуры, которые в процессе работы осуществляют механические колебания (вибрируют).

Рассмотрим металлический неферромагнитный элемент радиоэлектронной аппаратуры, который вибрирует в постоянном или низкочастотном переменном магнитном поле.

Механические вибрации сопровождаются перемещениями материальных частиц этого элемента относительно положения равновесия. Обозначим эти перемещения вектором $\vec{u}(x_k, t)$, x_k ($k = 1; 2; 3$) – координаты точки, в которой определяем смещение; t – время). Перемещения $\vec{u}(x_k, t)$ материальных частиц деформируемого металла сопровождены точно такими же по значениям перемещениями свободных носителей электричества (электронов проводимости). В присутствии магнитного поля (источниками магнитного поля могут служить обмотки электродвигателя, дроссели и т. п.) с напряженностью $\vec{H}^0(x_k, t)$ движущиеся электроны проводимости подвержены воздействию силы Лоренца, в результате чего возникают замкнутые вихревые токи. Плотность $\vec{J}(x_k, t)$ этих токов:

$$\vec{J}(x_k, t) = \sigma \mu_0 \left[\frac{\partial \vec{u}(x_k, t)}{\partial t} \times \vec{H}^0(x_k, t) \right],$$

где σ – удельная электрическая проводимость изотропного по электрофизическим свойствам металла; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; в квадратных скобках записано произведение вектора скорости перемещения электронов проводимости на вектор напряженности магнитного поля, которое создано в неферромагнитном металлическом элементе внешними источниками.

Таким образом, вихревые токи $\vec{J}(x_k, t)$ – это источники электромагнитного поля, изменяющегося во времени с той же скоростью, что и напряженно-деформированное состояние вибрирующего металлического элемента радиоэлектронной аппаратуры. Обозначим напряженность поля магнитной составляющей эмитируемого низкочастотного электромагнитного поля символом $\vec{H}^B(x_k, t)$. Тогда можно, утверждать, что при наличии созданного внешними источниками магнитного поля $\vec{H}^0(x_k, t)$ вибрирующий металлический элемент радиоэлектронной аппаратуры преобразует вектор колебательной скорости $\vec{v}(x_k, t) = \partial \vec{u}(x_k, t) / \partial t$ в вектор $\vec{H}^B(x_k, t)$.

Из курса математического анализа [50] известно, что преобразование одного вектора в другой происходит с помощью тензора второго ранга. Таким образом, при формальном (математически) подходе, справедлива запись:

$$H_m^B(x_k, t) = \Pi_{mn}(x_k, t, p) v_n(x_k, t),$$

где $H_m^B(x_k, t)$ – m -ый компонент вектора напряженности магнитной составляющей эмитируемого электромагнитного поля; $\Pi_{mn}(x_k, t, p)$ – компонент тензорной передаточной функции источника низкочастотного электромагнитного поля; символом p в группе аргументов передаточной функции обозначен набор геометрических и физико-механических параметров металлического элемента радиоэлектронной аппаратуры; $v_n(x_k, t)$ – n -ый компонент вектора колебательной скорости материальной частицы (бесконечно малого деформируемого объема) металлического элемента радиоэлектронной

аппаратуры; запись последнего соотношения предполагает суммирование по дважды повторяющимся индексам.

Академик А. Н. Тихонов в статье «Математическая модель» [51] приводит следующее определение: «Математическая модель – приближенное описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное с помощью математической символики». Принимая во внимание это определение, можно утверждать, что тензор второго ранга, в общем случае несимметричный, т. е. математический объект, образованный девятью псевдоскалярными компонентами $\Pi_{mn}(x_k, t, p)$, имеет смысл математической модели источника низкочастотных электромагнитных помех.

Аналитическая конструкция элементов тензорной пи-функции, т. е. компонентов $\Pi_{mn}(x_k, t, p)$, определена формой металлического элемента, типом упругих колебаний в нем и характером распределения магнитного поля $\vec{H}^0(x_k, t)$ в объеме вибрирующего элемента. Какие-либо практически значимые обобщения относительно аналитических свойств элементов матрицы пи-функции, т. е. относительно элементов математической модели некоего обобщенного источника низкочастотных электромагнитных помех, сделать невозможно. Для каждой формы металлического элемента радиоэлектронной аппаратуры необходимо решать конкретную граничную задачу электродинамики об эмиссии низкочастотного электромагнитного поля, и уже после этого определять компоненты тензорной пи-функции.

2.2 Характеристики процесса эмиссии электромагнитного поля вибрирующим стержнем из металла неферромагнитной группы

В бесконечном стержне кругового поперечного сечения бегущую упругую волну определим:

$$u_\beta(z, t) = U_\beta e^{i(\omega t - \gamma z)}, \quad (2.1)$$

где индекс β может принимать одно из трех значений, а именно $\beta = z$ (продольная волна сжатия-растяжения); $\beta = \phi$ (крутильная или сдвиговая волна); $\beta = \rho$ (упругая волна поперечного изгиба); U_β – амплитудный множитель упругой волны того или иного типа; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; ω – круговая частота смены знака напряженно-деформированного состояния стержня; γ – соответствующее типу упругой волны волновое число; z – координатная ось цилиндрической системы координат (ρ, ϕ, z) , которая совпадает с осью симметрии стержня (рисунок 2.1).

На рисунке 2.1 представлен стержень в прямоугольной (правосторонней декартовой) (x_1, x_2, x_3) и цилиндрической (ρ, ϕ, z) системах координат в задаче об излучении низкочастотного электромагнитного поля. Между символами координатных осей декартовой и цилиндрической систем координат существует взаимно однозначное соответствие: $1 \Leftrightarrow \rho$; $2 \Leftrightarrow \phi$; $3 \Leftrightarrow z$. Формула (2.1), которая характеризует суперпозицию бегущих в противоположных направлениях гармонических волн, может описать любой, из перечисленных выше, тип упругих колебаний (вибраций) стержня конечной длины.

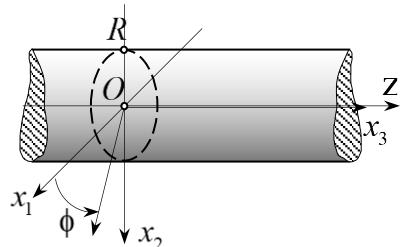


Рисунок 2.1 – Стержень с круговым поперечным сечением

Стержень с круговым поперечным сечением радиуса R , выполнен из поликристаллического неферромагнитного металла и находится в постоянном магнитном поле, напряженность которого определяет вектор $\vec{H}^0(\rho, \phi)$ т. е. напряженность магнитного поля постоянна по длине стержня.

При упругих колебаниях элементов объема стержня в движение вовлечены электроны проводимости, взаимодействующие с постоянным магнитным полем и образующие замкнутые вихревые токи, изменяющиеся во времени по

гармоническому закону $e^{i\omega t}$. Плотность вихревых токов определена вектором $\vec{J}(\rho, \phi, z)e^{i\omega t}$. Амплитудное значение $J_k(\rho, \phi, z)$ k -го компонента вектора плотности вихревых токов определяют:

$$J_k(\rho, \phi, z) = i\omega\sigma\mu_0\epsilon_{kmn}U_m e^{-iyz}H_n^0(\rho, \phi),$$

где ϵ_{kmn} – компонент тензора Леви-Чивиты [52], который равен +1, когда индексы k , m и n образуют четное число перестановок чисел 1, 2 и 3, т. е. образуют комбинации 123; 231; 312; ϵ_{kmn} равен –1, когда индексы k , m и n образуют нечетное число перестановок чисел 1, 2 и 3, т. е. образуют комбинации 132; 321; 213; компонент тензора Леви-Чивиты равен нулю, если какие-либо два из трех индексов одинаковы.

Вихревой электрический ток $\vec{J}e^{i\omega t}$ (здесь и далее аргументы ρ, ϕ, z , т. е. координаты точки, в которой определяют физическое состояние металлического стержня, для краткости далее не записываем) создает в стержне и за его пределами переменное электромагнитное поле. В объеме стержня амплитудные значения составляющих электромагнитного поля удовлетворяют уравнениям Максвелла, которые в пренебрежении токами смещения записываем в следующем виде:

$$\text{rot } \vec{H} = \sigma \vec{E} + \vec{J}, \quad (2.2)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -i\omega\mu_0 \vec{H}, \quad (2.3)$$

где \vec{E} и \vec{H} – амплитудные значения векторов напряженности электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля, изменяющиеся в объеме стержня во времени по гармоническому закону $e^{i\omega t}$. Вычисляя ротор от левой и правой частей уравнения (2.3), и подставляя в полученный результат вместо $\text{rot } \vec{H}$ правую часть уравнения (2.2), получаем неоднородное дифференциальное уравнение:

$$\text{rot rot } \vec{E} + i\omega\sigma\mu_0 \vec{E} = -i\omega\mu_0 \vec{J}. \quad (2.4)$$

Если определить дивергенцию левой и правой частей уравнения (2.2), то получим условие, которое дополняет уравнение (2.4)

$$\operatorname{div}(\sigma \vec{E} + \vec{J}) = 0. \quad (2.5)$$

Полагаем, что стержень расположен в вакууме. Уравнения Максвелла для амплитудных значений \vec{H}^B и \vec{E}^B векторов напряженности магнитной и электрической составляющих изменяющегося во времени по закону $e^{i\omega t}$ электромагнитного поля в вакууме записываем в виде:

$$\operatorname{rot} \vec{H}^B = i\omega \epsilon_0 \vec{E}^B, \quad (2.6)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E}^B = -i\omega \mu_0 \vec{H}^B, \quad (2.7)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \Phi/m$ – диэлектрическая постоянная.

Вычисляя ротор от левой и правой части уравнения (2.6), и подставляя в полученный результат вместо $\operatorname{rot} \vec{E}^B$ правую часть уравнения (2.7), получаем дифференциальное уравнение для определения характеристик поля рассеяния или поля, которое эмитирует в окружающее пространство колеблющийся металлический стержень.

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H}^B - k_0^2 \vec{H}^B = 0, \quad (2.8)$$

где $k_0 = \omega/c_0$ – волновое число электромагнитных колебаний в вакууме; $c_0 = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – скорость распространения электромагнитных волн в пустоте.

Вычисляя дивергенцию от левой и правой части уравнения (2.7), получаем дополняющее уравнения (2.8) условие

$$\operatorname{div} \vec{H}^B = 0. \quad (2.9)$$

Решения уравнения (2.8) должны удовлетворять условиям физической реализуемости источника поля. Физически реализуемые источники обладают конечной мощностью и по этой причине созданные ими поля нельзя обнаружить на достаточно большом удалении. Т.е., вектор \vec{H}^B должен удовлетворять следующим предельным условиям:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} \left\{ \vec{H}^B, \frac{\partial \vec{H}^B}{\partial \rho}, \frac{\partial \vec{H}^B}{\partial \phi}, \frac{\partial \vec{H}^B}{\partial z} \right\} = 0, \quad (2.10)$$

где d – расстояние от боковой поверхности $\rho = R$ металлического стержня.

На границе раздела двух сред, т. е. на боковой поверхности $\rho = R$ металлического неферромагнитного стержня должны быть выполнены условия сопряжения полей, которые записываем в виде:

$$\left[H_\beta(\rho, \phi, z) - H_\beta^B(\rho, \phi, z) \right]_{\rho=R} = 0, \quad \beta = \rho; \phi; z. \quad (2.11)$$

Уравнения (2.4) и (2.8), с дополняющими их условиями (2.5), (2.9) и (2.10), в совокупности с граничными условиями (2.11), описывают граничную задачу о низкочастотном электромагнитном поле, которое эмитирует колеблющийся металлический стержень.

Строгие постановки и решения задач электродинамики сплошных сред, выполненные во второй половине двадцатого века [53, 54, 55, 56], позволяют утверждать, что в деформируемых сплошных средах с поляризационными (электро- и магнитоупругими) эффектами существуют две системы электромагнитных волн.

Одну из них называют медленной, поскольку распространяется со скоростью упругих волн. Вторую систему называют быстрой, она распространяется со скоростью электромагнитных волн в среде.

В случае, когда источник электромагнитных возмущений упругие деформации, отношение энергоемкости быстрой системы электромагнитных волн к медленной прямо пропорционально квадрату отношения скорости распространения упругой волны к скорости распространения электромагнитного процесса в сплошной среде.

По этой причине при решении настоящей задачи можно не принимать во внимание факт существования быстрой системы электромагнитных волн.

В общем случае компоненты вектора плотности вихревого тока представим в виде:

$$J_\rho(\rho, \phi, z) = e^{-i\gamma z} \sum_{n=0}^{\infty} J_\rho^{(n)}(\rho) \begin{pmatrix} \cos n\phi \\ \sin n\phi \end{pmatrix}, \quad J_\phi(\rho, \phi, z) = e^{-i\gamma z} \sum_{n=0}^{\infty} J_\phi^{(n)}(\rho) \begin{pmatrix} -\sin n\phi \\ \cos n\phi \end{pmatrix},$$

$$J_z(\rho, \phi, z) = e^{-i\gamma z} \sum_{n=0}^{\infty} J_z^{(n)}(\rho) \begin{pmatrix} \cos n\phi \\ \sin n\phi \end{pmatrix},$$

$$\text{где } J_{\rho(z)}^{(n)}(\rho) = \frac{1}{\delta\pi} \int_0^{2\pi} J_{\rho(z)}(\rho, \phi) \begin{pmatrix} \cos n\phi \\ \sin n\phi \end{pmatrix} d\phi; \quad J_{\phi}^{(n)}(\rho) = \frac{1}{\delta\pi} \int_0^{2\pi} J_{\phi}(\rho, \phi) \begin{pmatrix} -\sin n\phi \\ \cos n\phi \end{pmatrix} d\phi;$$

$$\delta = 2 \text{ при } n = 0 \text{ и } \delta = 1 \forall n \geq 1; \quad J_{\beta}(\rho, \phi) = i\omega\sigma\mu_0\varepsilon_{\beta mn}U_m H_n^0(\rho, \phi); \quad \beta = 1(\rho); 2(\phi); 3(\phi).$$

Общее решение системы неоднородных дифференциальных уравнений, которая следует из векторного уравнения (2.4), удовлетворяющее условию (2.5) и условию непротекания тока проводимости через боковую поверхность $\rho = R$ стержня ($E_{\rho}(R, \phi, z) = 0$), имеет вид

$$E_{\rho(z)}(\rho, \phi, z) = e^{-i\gamma z} \sum_{n=0}^{\infty} E_{\rho(z)}^{(n)}(\rho) \begin{pmatrix} \cos n\phi \\ \sin n\phi \end{pmatrix}, \quad E_{\phi}(\rho, \phi, z) = e^{-i\gamma z} \sum_{n=0}^{\infty} E_{\phi}^{(n)}(\rho) \begin{pmatrix} -\sin n\phi \\ \cos n\phi \end{pmatrix},$$

где

$$E_{\rho}^{(n)}(\rho) = \frac{1}{2} \left\{ \left[A_1^{(n)} - \frac{1}{\zeta^2} \int_x^{x_R} y Q^{(+)}(y/\zeta) K_{n-1}(y) dy \right] I_{n-1}(x) + \left[A_2^{(n)} - \frac{1}{\zeta^2} \int_x^{x_R} y Q^{(-)}(y/\zeta) K_{n+1}(y) dy \right] I_{n+1}(x) - \frac{1}{\zeta^2} \left[K_{n-1}(x) \int_0^x y Q^{(+)}(y/\zeta) I_{n-1}(y) dy + K_{n+1}(x) \int_0^x y Q^{(-)}(y/\zeta) I_{n+1}(y) dy \right] \right\}; \quad (2.12)$$

$$E_{\phi}^{(n)}(\rho) = \frac{1}{2} \left[\left[A_1^{(n)} - \frac{1}{\zeta^2} \int_x^{x_R} y Q^{(+)}(y/\zeta) K_{n-1}(y) dy \right] I_{n-1}(x) - \left[A_2^{(n)} - \frac{1}{\zeta^2} \int_x^{x_R} y Q^{(-)}(y/\zeta) K_{n+1}(y) dy \right] I_{n+1}(x) - \frac{1}{\zeta^2} \left[K_{n-1}(x) \int_0^x y Q^{(+)}(y/\zeta) I_{n-1}(y) dy - K_{n+1}(x) \int_0^x y Q^{(-)}(y/\zeta) I_{n+1}(y) dy \right] \right]; \quad (2.13)$$

$$E_z^{(n)}(x) = \left[A_3^{(n)} - \frac{1}{\zeta^2} \int_x^{x_R} y Q_z^{(n)}(y/\zeta) K_n(y) dy \right] I_n(x) - \frac{K_n(x)}{\zeta^2} \int_0^x y Q_z^{(n)}(y/\zeta) I_n(y) dy, \quad (2.14)$$

где $\zeta^2 = \gamma^2 + i\omega\sigma\mu_0$ – квадрат комплексного волнового числа, которое учитывает омические потери энергии вихревых токов; $A_k^{(n)}$ ($k = 1, 2, 3$) – константы; $x = \zeta\rho$ – безразмерная радиальная координата; $x_R = \zeta R$; $Q_{\rho}^{(\pm)}(\rho) = Q_{\rho}^{(n)}(\rho) \pm Q_{\phi}^{(n)}(\rho)$; $K_v(x)$ и $I_v(x)$ – модифицированные цилиндрические функции [57];

$$Q_{\rho}^{(n)}(\rho) = i\omega\mu_0 J_{\rho}^{(n)}(\rho) - \partial Q^{(n)}(\rho)/\partial \rho; \quad Q_{\phi}^{(n)}(\rho) = i\omega\mu_0 J_{\phi}^{(n)}(\rho) - n Q^{(n)}(\rho)/\rho; \\ Q^{(n)}(\rho) = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{1}{\rho} J_{\rho}^{(n)}(\rho) + \frac{\partial J_{\rho}^{(n)}(\rho)}{\partial \rho} - \frac{n}{\rho} J_{\phi}^{(n)}(\rho) - i\gamma J_z^{(n)}(\rho) \right]; \quad Q_z^{(n)}(\rho) = i\omega\mu_0 J_z^{(n)}(\rho) + i\gamma Q^{(n)}(\rho)/\sigma$$

– известные функции радиальной координаты ρ .

Константы $A_2^{(n)}$ и $A_3^{(n)}$ выражаем через константу $A_1^{(n)}$:

$$A_2 = -A_1 \frac{I_{n-1}(x_R)}{I_{n+1}(x_R)} + \frac{\Xi_1(x_R)}{I_{n+1}(x_R)}, \quad A_3 = -i \left\{ A_1 \frac{\zeta [I_{n+1}(x_R) - I_{n-1}(x_R)]}{2 I_{n+1}(x_R)} + \frac{\Xi_3(x_R)}{\gamma I_n(x_R)} \right\},$$

где $\Xi_3(x_R) = Q^{(n)}(x_R/\zeta) + \zeta I_n(x_R) \frac{\Xi_1(x_R)}{2 I_{n+1}(x_R)} +$

$$+ \frac{K_n(x_R)}{\zeta^2} \left\{ \frac{\zeta}{2} \left[\int_0^{x_R} y Q^{(+)}(y/\zeta) I_{n-1}(y) dy + \int_0^{x_R} y Q^{(-)}(y/\zeta) I_{n+1}(y) dy \right] + i\gamma \int_0^{x_R} y Q_z^{(n)}(y/\zeta) I_n(y) dy \right\}.$$

Фигурирующие в граничных условиях (2.11) компоненты вектора напряженности $\vec{H}(\rho, \phi, z)$ переменного магнитного поля в объеме металлического стержня определяем из уравнения (2.3) и записываем в виде:

$$H_\rho(\rho, \phi, z) = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z(\rho, \phi, z)}{\partial \phi} - \frac{\partial E_\phi(\rho, \phi, z)}{\partial z} \right] =$$

$$= -\frac{e^{-i\gamma z}}{i\omega\mu_0} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{n}{\rho} E_z^{(n)}(\rho) - i\gamma E_\phi^{(n)}(\rho) \right] \begin{pmatrix} -\sin n\phi \\ \cos n\phi \end{pmatrix}, \quad (2.15)$$

$$H_\phi(\rho, \phi, z) = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \left[\frac{\partial E_\rho(\rho, \phi, z)}{\partial z} - \frac{\partial E_z(\rho, \phi, z)}{\partial \rho} \right] =$$

$$= -\frac{e^{-i\gamma z}}{i\omega\mu_0} \sum_{n=0}^{\infty} \left[-i\gamma E_\rho^{(n)}(\rho) - \frac{\partial E_z^{(n)}(\rho)}{\partial \rho} \right] \begin{pmatrix} \cos n\phi \\ \sin n\phi \end{pmatrix}, \quad (2.16)$$

$$H_z(\rho, \phi, z) = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial [\rho E_\phi(\rho, \phi, z)]}{d\rho} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_\rho(\rho, \phi, z)}{\partial \phi} \right\} =$$

$$= -\frac{e^{-i\gamma z}}{i\omega\mu_0} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial [\rho E_\phi^{(n)}(\rho)]}{\partial \rho} - \frac{n}{\rho} E_\rho^{(n)}(\rho) \right\} \begin{pmatrix} -\sin n\phi \\ \cos n\phi \end{pmatrix}, \quad (2.17)$$

где величины $E_\rho^{(n)}(\rho)$, $E_\phi^{(n)}(\rho)$ и $E_z^{(n)}(\rho)$ определены соотношениями (2.12) – (2.14).

При этом необходимо подчеркнуть, что в соотношениях (2.15) – (2.17) фигурирует лишь одна неизвестная константа A_1 .

Решения системы из трех скалярных дифференциальных уравнений, которые следуют из векторного уравнения (2.8) и удовлетворяют условию (2.9) и предельным условиям (2.10), имеют вид:

$$H_{\rho(z)}^B(\rho, \phi, z) = e^{-iz} \sum_{n=0}^{\infty} H_{\rho(z)}^{B(n)}(\rho) \begin{pmatrix} -\sin n\phi \\ \cos n\phi \end{pmatrix}, \quad H_{\phi}^B(\rho, \phi, z) = e^{-iz} \sum_{n=0}^{\infty} H_{\phi}^{B(n)}(\rho) \begin{pmatrix} \cos n\phi \\ \sin n\phi \end{pmatrix},$$

где $H_{\rho}^{B(n)}(\rho) = \frac{1}{2} [B_1 K_{n+1}(\gamma\rho) + B_2 K_{n-1}(\gamma\rho)]$; $H_{\phi}^{B(n)}(\rho) = \frac{1}{2} [B_1 K_{n+1}(\gamma\rho) - B_2 K_{n-1}(\gamma\rho)]$;

$$H_z^{B(n)}(\rho) = B_3 K_n(\gamma\rho); \quad B_3 = i(B_1 + B_2).$$

Очевидно, что в выражениях для расчета компонентов $H_{\beta}^{B(n)}(\rho)$ вектора напряженности магнитного поля рассеяния фигурируют лишь две подлежащие определению константы B_1 и B_2 .

Таким образом, необходимо определить три константы A_1 , B_1 и B_2 , и для этого существует три граничных условия (2.11). Из граничных условий (2.11) константы A_1 , B_1 и B_2 определяют единственным образом, что позволяет говорить, что граничная задача (2.4), (2.5), (2.8) – (2.11) об эмиссии низкочастотного электромагнитного поля колеблющимся стержнем из неферромагнитного металла полностью решена.

После определения выражений для расчета констант B_1 и B_2 последовательно полагая в $U_1 \neq 0$, $U_2 = U_3 = 0$; $U_2 \neq 0$, $U_1 = U_3 = 0$ и $U_3 \neq 0$, $U_1 = U_2 = 0$ определяем элементы первого $\Pi_{m1}(x_k, \omega, p)$, второго $\Pi_{m2}(x_k, \omega, p)$ и третьего $\Pi_{m3}(x_k, \omega, p)$ столбцов матрицы пи-функции, т. е. математической модели источника гармонически изменяющегося во времени по закону $e^{i\omega t}$ низкочастотного электромагнитного поля.

2.3 Определение продольных колебаний стержня в поперечном постоянном магнитном поле

Предположим, что в стержне (рисунок 2.1) распространяется продольная волна сжатия-растяжения. При этом вектор смещения материальных частиц металлического стержня полностью определяет аксиальный компонент $u_z(z, t)$, причем:

$$u_z(z, t) = U_z e^{i(\omega t - \gamma z)}.$$

Полагаем, что металлический стержень расположен в однородном поперечном постоянном магнитном поле, вектор напряженности которого не зависит от декартовых координат точки наблюдения за характеристиками поля и ориентирован вдоль координатной оси Ox_1 .

В этом случае вектор плотности вихревого тока полностью определен поперечным компонентом $J_2(x_k, t) = J_2(x_k) e^{i\omega t}$, амплитудное значение $J_2(x_k)$ которого:

$$J_2(x_k) = -i J_0 e^{-i\gamma z},$$

где $J_0 = \omega \sigma \mu_0 U_z H_1^0$; H_1^0 – напряженность поперечного магнитного поля.

В цилиндрической системе координат (ρ, ϕ, z) , ось z , которая связана с осью симметрии стержня (рисунок 2.1), амплитудное значение вектора плотности вихревого тока определено двумя компонентами, а именно:

$$J_\rho = -i J_0 e^{-i\gamma z} \sin \phi, \quad J_\phi = -i J_0 e^{-i\gamma z} \cos \phi, \quad (2.18)$$

при этом $J_z = 0$. Из определения (2.18) следует, что амплитудные значения компонентов вектора напряженности переменного электрического поля в объеме металлического стержня необходимо отыскивать в виде:

$$E_{\rho(z)}(\rho, \phi, z) = e^{-i\gamma z} E_\rho(\rho) \sin \phi, \quad E_\phi(\rho, \phi, z) = e^{-i\gamma z} E_\phi(\rho) \cos \phi.$$

Правая часть дифференциального уравнения для аксиального компонента вектора напряженности переменного электрического поля равна нулю, поэтому:

$$E_z(\rho) = A_3 I_1(\zeta \rho). \quad (2.19)$$

Компоненты $E_\rho(\rho)$ и $E_\phi(\rho)$ определяют соотношения:

$$E_\rho(\rho) = \frac{1}{2} [A_1 I_0(\zeta \rho) + A_2 I_2(\zeta \rho)] + \frac{\omega \mu_0 J_0}{\zeta^2} [\zeta R K_1(\zeta R) I_0(\zeta \rho) - 1], \quad (2.20)$$

$$E_\phi(\rho) = \frac{1}{2} [A_1 I_0(\zeta \rho) - A_2 I_2(\zeta \rho)] + \frac{\omega \mu_0 J_0}{\zeta^2} [\zeta R K_1(\zeta R) I_0(\zeta \rho) - 1]. \quad (2.21)$$

Из условия непротекания тока проводимости через боковую поверхность $\rho = R$ металлического стержня и условия $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ находим константы A_2 и A_3 :

$$A_2 = \left[-A_1 + \frac{i J_0}{\sigma} \zeta R K_1(\zeta R) \right] \frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)}.$$

$$A_3 = -\frac{i\zeta}{\gamma} A_1 \left[1 - \frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} \right] + \frac{\zeta J_0}{\gamma \sigma} \zeta R K_1(\zeta R) \left[\frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} - 2 \right].$$

После определения констант A_2 и A_3 выражения (2.19) – (2.21) записываем:

$$E_\rho(\rho) = \left[\frac{1}{2} A_1 - \frac{i J_0}{\sigma} \zeta R K_1(\zeta R) \right] \left[I_0(\zeta \rho) - \frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} I_2(\zeta \rho) \right] + \frac{i J_0}{\sigma}, \quad (2.22)$$

$$E_\phi(\rho) = \left[\frac{1}{2} A_1 - \frac{i J_0}{\sigma} \zeta R K_1(\zeta R) \right] \left[I_0(\zeta \rho) + \frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} I_2(\zeta \rho) \right] + \frac{i J_0}{\sigma}, \quad (2.23)$$

$$E_z(\rho) = \frac{i\zeta}{\gamma} \left\{ A_1 \left[1 - \frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} \right] + \frac{i J_0}{\sigma} \zeta R K_1(\zeta R) \left[\frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} - 2 \right] \right\} I_1(\zeta \rho). \quad (2.24)$$

Подставляя выражения (2.22) – (2.24) в определения (2.15) – (2.17), и полагая в полученных результатах $\rho = R$, получаем выражения для расчета амплитудных значений компонентов вектора напряженности переменного магнитного поля на боковой поверхности металлического стержня:

$$H_\rho(R) = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \left[-\frac{i\zeta^2}{\gamma} A_1 F_\rho(\zeta R) + \frac{\zeta^2 J_0}{\gamma \sigma} \Phi_\rho(\zeta R) \right],$$

$$H_\phi(R) = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \left[\frac{i\zeta^2}{\gamma} A_1 F_\phi(\zeta R) - \frac{\zeta^2 J_0}{\gamma \sigma} \Phi_\phi(\zeta R) \right],$$

$$H_z(R) = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \left[\zeta A_1 F_z(\zeta R) - \frac{i\zeta J_0}{\sigma} \Phi_z(\zeta R) \right],$$

где $F_\rho(\zeta R) = \left[1 - \frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} \right] \frac{I_1(\zeta R)}{\zeta R} - \left(\frac{\gamma}{\zeta} \right)^2 I_0(\zeta R);$

$$\Phi_\rho(\zeta R) = \zeta R K_1(\zeta R) \left\{ \frac{I_1(\zeta R)}{\zeta R} \left[\frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} - 2 \right] - \left(\frac{\gamma}{\zeta} \right)^2 I_0(\zeta R) \right\} + \left(\frac{\gamma}{\zeta} \right)^2;$$

$$F_\phi(\zeta R) = \left[1 - \frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} \right] \left[I_0(\zeta R) - \frac{I_1(\zeta R)}{\zeta R} \right];$$

$$\Phi_\phi(\zeta R) = \zeta R K_1(\zeta R) \left[\frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} - 2 \right] \left[I_0(\zeta R) - \frac{I_1(\zeta R)}{\zeta R} \right] - \left(\frac{\gamma}{\zeta} \right)^2;$$

$$F_z(\zeta R) = \frac{1}{2} I_1(\zeta R) \left[1 + \frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} \right]; \quad \Phi_z(\zeta R) = \zeta R K_1(\zeta R) \left[1 + \frac{I_0(\zeta R)}{I_2(\zeta R)} \right] I_1(\zeta R).$$

Границные условия (2.11) записываем следующим образом

$$\begin{aligned}
i A_1 F_\rho(\zeta R) - \frac{\gamma}{2\sigma} B_1 K_2(\gamma R) - \frac{\gamma}{2\sigma} B_2 K_0(\gamma R) &= \frac{J_0}{\sigma} \Phi_\rho(\zeta R), \\
-i A_1 F_\phi(\zeta R) - \frac{\gamma}{2\sigma} B_1 K_2(\gamma R) + \frac{\gamma}{2\sigma} B_2 K_0(\gamma R) &= -\frac{J_0}{\sigma} \Phi_\phi(\zeta R), \\
A_1 F_z(\zeta R) - \frac{i\zeta}{\sigma} B_1 K_1(\gamma R) - \frac{i\zeta}{\sigma} B_2 K_1(\gamma R) &= -i \frac{J_0}{\sigma} \Phi_z(\zeta R).
\end{aligned} \tag{2.25}$$

При записи системы уравнений (2.25) использовано неравенство $|i\omega\sigma\mu_0| \gg \gamma^2$. При этом $\zeta^2/(i\omega\mu_0) \approx \sigma$.

Константы B_1 и B_2 определяем из системы уравнений (2.25) единственным образом. Выражения для их расчета имеют вид:

$$B_1 = H_0 \frac{D_1}{D_0}, \quad B_2 = H_0 \frac{D_2}{D_0}, \tag{2.26}$$

где $H_0 = 2J_0/\gamma = \sigma\mu_0 v_{CT} U_z H_1^0$ – константа с размерностью ампер, деленная на метр, которая характеризует абсолютную производительность источника низкочастотного электромагнитного поля; $v_{CT} = \sqrt{Y/\rho_0}$ – стержневая скорость распространения продольных колебаний в металлическом стержне (Y и ρ_0 – модуль Юнга и плотность металла).

Для источника с параметрами $\sigma = 15 \cdot 10^6 \text{ См/м}$; $v_{CT} = 5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ при $U_z = 1 \text{ м}$ и $H_1^0 = 1 \text{ А/м}$, константа $H_0 = 60\pi \cdot 10^3 \text{ А/м}$. Поскольку реальные значения $U_z \leq 10^{-6} \text{ м}$, то реальные значения абсолютной производительности источника низкочастотных помех $H_0 \leq 2 \cdot 10^{-3} \text{ А/м}$. Символами D_0 , D_1 и D_2 в формулах (2.26) обозначены определители матриц:

$$\begin{aligned}
D_0 &= \det \begin{vmatrix} F_\rho(\zeta R) & -K_2(\gamma R) & -K_0(\gamma R) \\ -F_\phi(\zeta R) & -K_2(\gamma R) & K_0(\gamma R) \\ -F_z(\zeta R) & \frac{2\zeta}{\sigma} K_1(\gamma R) & \frac{2\zeta}{\sigma} K_1(\gamma R) \end{vmatrix}; \quad D_1 = \det \begin{vmatrix} F_\rho(\zeta R) & \Phi_\rho(\zeta R) & -K_0(\gamma R) \\ -F_\phi(\zeta R) & -\Phi_\phi(\zeta R) & K_0(\gamma R) \\ -F_z(\zeta R) & \Phi_z(\zeta R) & \frac{2\zeta}{\sigma} K_1(\gamma R) \end{vmatrix}; \\
D_2 &= \det \begin{vmatrix} F_\rho(\zeta R) & -K_2(\gamma R) & \Phi_\rho(\zeta R) \\ -F_\phi(\zeta R) & -K_2(\gamma R) & -\Phi_\phi(\zeta R) \\ -F_z(\zeta R) & \frac{2\zeta}{\sigma} K_1(\gamma R) & \Phi_z(\zeta R) \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

На рисунке 2.2. приведены результаты расчетов по формулам (2.26) коэффициентов B_1 и B_2 . Модуль (кривая 1), действительная (кривая 2) и мнимая (кривая 3) части коэффициентов B_1 (а) и B_2 (б) как функции безразмерной частоты $\Omega = \gamma R = \omega \tau_0$ ($\tau_0 = R/v_{\text{CT}}$).

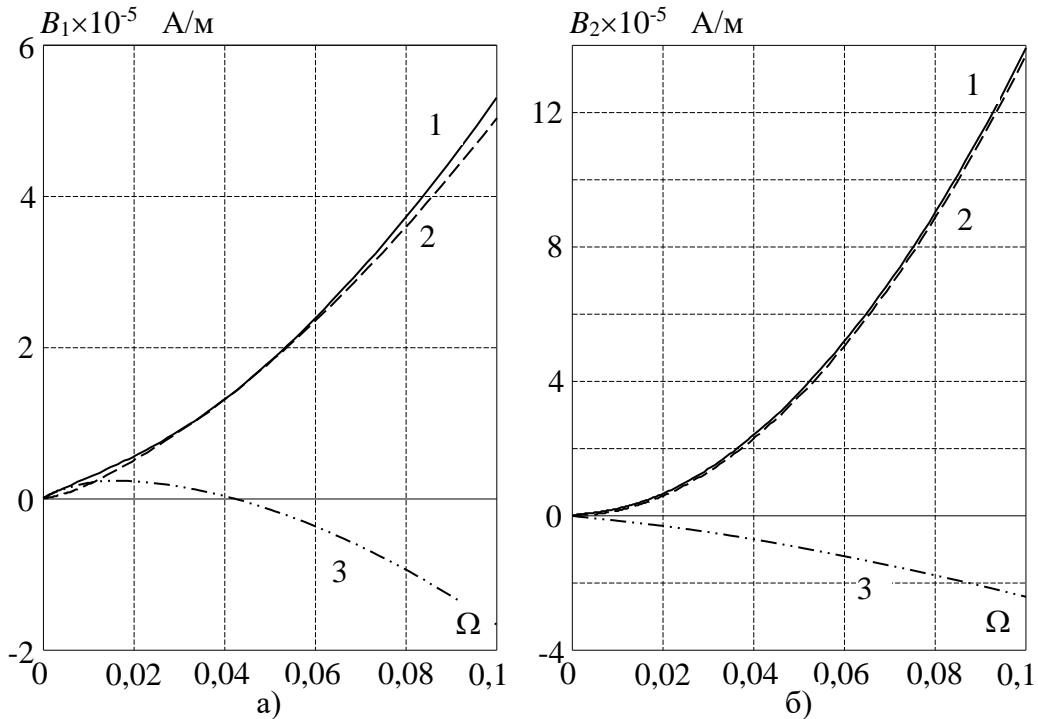


Рисунок 2.2 – Результаты расчетов

Вычисления выполнены для набора параметров: $\sigma = 15 \cdot 10^6$ См/м; $v_{\text{CT}} = 5 \cdot 10^3$ м/с; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $R = 5 \cdot 10^{-3}$ м; $U_z = 10^{-6}$ м; $H_1^0 = 1$ А/м. По осям ординат на рисунке 2.2 откладываем числовые значения действительной и мнимой частей, а также абсолютное значение коэффициентов B_1 и B_2 в амперах, деленных на метр. По осям абсцисс откладываем безразмерную частоту $\Omega = \gamma R = \omega \tau_0$, где $\tau_0 = R/v_{\text{CT}}$ – временной масштаб. Отчетливо видно, что действительная и мнимая части комплекснозначных коэффициентов B_1 и B_2 обращены в нуль при $\omega \rightarrow 0$, что полностью согласовано с физическим содержанием процесса генерации электромагнитного поля деформируемым металлическим элементом радиоэлектронной аппаратуры.

На рисунке 2.3 показано распределение в пространстве компонентов вектора напряженности магнитной составляющей низкочастотного электромагнитного поля $H_\beta^B(\rho)$, рассчитанное по значениям параметров, как и на рисунке 2.2 коэффициенты B_1 и B_2 .

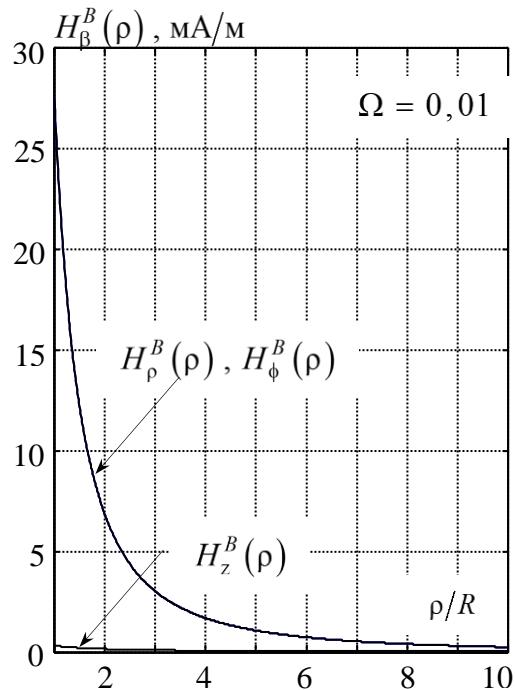


Рисунок 2.3 – Распределение компонентов вектора напряженности магнитного поля

Расчет выполнен на безразмерной частоте $\Omega = 0,01$, что при $R = 5 \cdot 10^{-3}$ м и $v_{CT} = 5 \cdot 10^3$ м/с соответствует циклической частоте $f = 15,92$ кГц. Кривые для радиального и окружного компонента идентичны, поскольку при малых значениях аргумента функция Макдональда второго порядка существенно превосходит функцию Макдональда нулевого порядка. При прохождении через одновитковую рамку площадью $S = 10^{-4}$ м², которая ориентирована перпендикулярно радиальной оси, переменное магнитное поле с напряженностью $H_\rho^B(\rho) = 5$ мА/м создаст на частоте $f = 15,92$ кГц разность потенциалов $U_n \approx -i\omega\mu_0 H_\rho^B S = 63$ нВ. И это при напряженности постоянного поля $H_1^0 = 1$ А/м. При увеличении напряженности постоянного магнитного поля

возрастает и напряжение помех, что необходимо учитывать при оценке электромагнитной обстановки. Значительные уровни напряженности постоянного магнитного поля могут вызывать помехи, достигающие единиц микровольт. Выражения для расчета компонентов $H_{\rho}^B(\rho, \phi, z)$, $H_{\phi}^B(\rho, \phi, z)$ и $H_z^B(\rho, \phi, z)$ вектора напряженности магнитной составляющей низкочастотного электромагнитного поля, будучи разделены на величину U_z , приобретают смысл компонентов $\Pi_{13}(x_k, \omega, p)$, $\Pi_{23}(x_k, \omega, p)$ и $\Pi_{33}(x_k, \omega, p)$ соответственно стационарной тензорной пи-функции, т. е. математической модели, рассмотренного выше стационарного источника электромагнитных помех звукового частотного диапазона.

2.4 Ферромагнитный экран как источник помех звукового диапазона частот

Ферромагнитные (магнитомягкие, магнитотвердые, магнитострикционные) материалы используются в различных системах и приборах современной техники, в частности в оборудовании киноконцертного комплекса, например: электродвигателях, трансформаторах, реле, магнитных головках для аналоговой и цифровой записи информации, постоянных магнитах для электроакустических преобразователей, экранов, сердечниках высокодобротных катушек индуктивности (в колебательных контурах, электрических фильтрах, элементах памяти и др.), линиях задержки для волноводов, фазовращателях, преобразователях частоты, модуляторах, усилителях и т.д.

В деталях силовых установок киноконцертного комплекса в связи с сравнительно низкой стоимостью широко используют тонколистную электротехническую кремнистую сталь. В зависимости от процента содержания кремния в стали применяют разные марки (1211, 1212, 1213, 1311, и др. (толщиной 0,15 – 0,5 мм)). Эти же марки стали также используют для штамповки пластин статора и ротора электродвигателей кинопроекционной техники. В

звуковоспроизводящих устройствах используют тонколистную электротехническую низкоуглеродистую сталь марок: Э, ЭА, ЭАА (толщиной 0,15 – 4,0 мм). Например, сталь марки Э320 и ферриты марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ применяют при изготовлении деталей трансформаторов и дросселей для профессионального звукового оборудования.

Таким образом, процессы формирования непреднамеренных электромагнитных помех для подробного описания ЭМО в помещении аппаратного киноконцертного комплекса с чувствительной аппаратурой, являются актуальной задачей и требуют экспериментальных измерений (*in situ*): вибросмещения, виброскорости, виброускорения [58], для определения наведенных помех.

Ниже на примере колеблющегося ферромагнитного диска рассмотрена процедура определения количественных характеристик низкочастотного переменного магнитного поля рассеяния.

2.4.1 Изгибные колебания ферромагнитного диска в постоянном магнитном поле

Рассмотрим диск (позиция 1 на рисунке 2.4) диаметром $2R_0$ и толщиной $2h$, причем $h/R_0 \ll 1$. Диск жестко закреплен в обойме (опоре) (позиция 2), которая совершает аксиальные гармонические колебания $U_0 e^{i\omega t}$, где U_0 – амплитуда смещения опоры от положения равновесия; $i = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота смены направления движения опоры; t – время.

Вся конструкция находится в постоянном магнитном поле, вектор магнитной индукции которого полностью определяется аксиальным компонентом B_z^ρ (ρ , z – координатные оси цилиндрической системы координат, начало которой располагается в срединной плоскости диска).

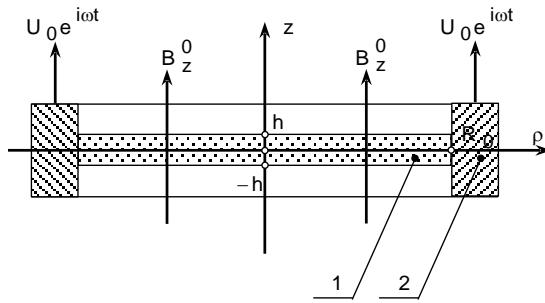


Рисунок 2.4 – Расчетная схема задачи о колебаниях ферромагнитного диска

Аксиальные колебания опоры порождают в диске гармонические осесимметричные колебания поперечного изгиба, в результате чего в нем возникают прогибы $w(\rho)e^{i\omega t}$. Амплитудные значения прогибов $w(\rho)$, т. е. отклонений в аксиальном направлении срединной плоскости колеблющегося диска от положения равновесия, определяются известным уравнением [59].

$$\nabla^4 w(\rho) - \lambda^4 w(\rho) = 0, \quad (2.27)$$

где дифференциальный оператор $\nabla^4 = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) \right) \right)$; λ – волновое число осесимметричных колебаний поперечного изгиба, причем $\lambda = \sqrt[4]{3\omega^2 \rho_0 (1 - \nu^2) / (Eh^2)}$; ρ_0 , ν и E – плотность, коэффициент Пуассона и модуль Юнга материала диска.

Общее решение уравнения (2.27) записывается в виде:

$$w(\rho) = AJ_0(\lambda\rho) + BI_0(\lambda\rho), \quad (2.28)$$

где A и B подлежащие определению константы; $J_0(\lambda\rho)$ и $I_0(\lambda\rho)$ – функция Бесселя и модифицированная функция Бесселя нулевого порядка.

Для показанной на рисунке 2.4 конструкции, общее решение (2.28) должно удовлетворять граничным условиям:

$$w(R_0) = U_0, \quad \left. \frac{\partial w(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R_0} = 0. \quad (2.29)$$

Подставляя в условия (2.29) выражение (2.28), определяем константы A и B . После этого выражение (2.28) можно записать в следующем виде:

$$w(\rho) = U_0 \frac{I_1(\lambda R_0)}{D(\lambda R_0)} \left[J_0(\lambda \rho) + I_0(\lambda \rho) \frac{J_1(\lambda R_0)}{I_1(\lambda R_0)} \right], \quad (2.30)$$

где $D(\lambda R_0) = J_0(\lambda R_0)I_1(\lambda R_0) + J_1(\lambda R_0)I_0(\lambda R_0)$ – определитель системы алгебраических уравнений, которая образуется после подстановки выражения (2.28) в условия (2.29).

При некоторых значениях аргумента λR_0 функция $D(\lambda R_0) = 0$. На частотах, которые соответствуют корням x_m ($m = 1, 2, \dots$) уравнения $D(x_m) = 0$ ($x = \lambda R_0$) существенно возрастают прогибы и деформации в центральной части колеблющегося диска. Очевидно, что эти частоты имеют смысл резонансных частот. Для диска с размерами $h = 10^{-3}$ и $R_0 = 10^{-1}$ из никеля марки НП2Т [60] ($E = 215$, $\nu = 0,35$ и $\rho_0 = 8,9 \cdot 10^3$) первым четырем корням уравнения $D(x_m) = 0$, т. е. величинам $x_1 = 3,196221$, $x_2 = 6,306437$, $x_3 = 9,439499$ и $x_4 = 12,577131$ соответствуют циклические частоты $f_1 = 492,5$ Гц, $f_2 = 1917,5$ Гц, $f_3 = 4295,9$ Гц и $f_4 = 7626,5$ Гц. На рисунке 2.5 показаны графики нормированных на величину U_0 прогибов на указанных выше первых четырех резонансных частотах. Номер резонансной частоты проставлен цифрой возле соответствующей кривой в поле рисунка. Расчеты выполнены в предположении, что добротность материала диска (никеля НП2Т) составляет пятьсот единиц.

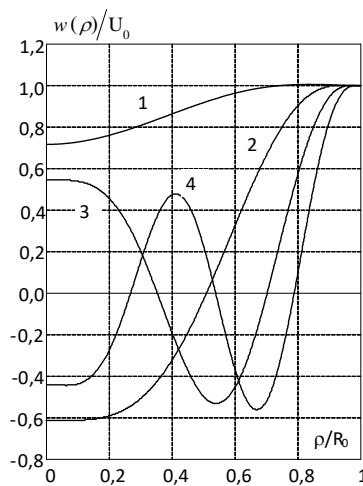


Рисунок 2.5 – Нормированные на величину U_0 прогибы ферромагнитного диска на первых четырех резонансных частотах

Аксиальным смещениям материальных частиц диска, т. е. величинам $u_z(\rho) = w(\rho)$, соответствуют радиальные перемещения $u_\rho(\rho) = -z \partial w(\rho)/\partial \rho$, где z – расстояние от срединной плоскости диска. Радиальные перемещения формируют радиальные и окружные деформации сжатия-растяжения $\varepsilon_{\rho\rho} = \partial u_\rho(\rho)/\partial \rho$ и $\varepsilon_{\phi\phi} = u_\rho(\rho)/\rho$. Эти деформации инициируют повороты магнитных доменов предварительно намагниченного ферромагнитного диска. Говоря иными словами, механические деформации в присутствии постоянного магнитного поля создают переменную намагниченность в объеме колеблющегося ферромагнитного диска.

В рамках линейного приближения [61] к общей феноменологической теории магнитострикционных явлений, которую разработал К.Б. Власов [62] в середине прошлого века, обусловленная механическими деформациями переменная намагниченность определяется вектором магнитной индукции \vec{B}^V , m -ый компонент которого:

$$B_m^V = m_{pmnk} H_p^0 \varepsilon_{nk}, \quad p, m, n, k = 1, 2, 3, \quad (2.31)$$

где m_{pmnk} – компонент изотропного тензора четвертого ранга магнитострикционных констант (размерность генри, деленный на метр), который определяется следующим образом:

$$m_{pmnk} = m_2 \delta_{pm} \delta_{nk} + \frac{(m_1 - m_2)}{2} (\delta_{pn} \delta_{mk} + \delta_{pk} \delta_{mn}), \quad (2.32)$$

где m_1 и m_2 – экспериментально определяемые магнитострикционные константы, причем $m_2 \approx -m_1/2$; магнитострикционные константы зависят от состава ферромагнетика и от величины поля подмагничивания [63]. Константа m_1 , по всей видимости, не превосходит значения 1 Гн/м ; $\delta_{pm}, \dots, \delta_{mn}$ – символы Кронекера. В формулах (2.31) и (2.32) предполагается суммирование по дважды повторяющимся индексам. Символами H_p^0 и ε_{nk} обозначены p -ый компонент вектора напряженности постоянного магнитного поля и компонент тензора деформации.

Поскольку между символами координатных осей правовинтовой декартовой системы координат (x_1, x_2, x_3) и символами координатных линий цилиндрической системы координат (ρ, ϕ, z) существует взаимно однозначное соответствие $x_1 \Leftrightarrow \rho$, $x_2 \Leftrightarrow \phi$ и $x_3 \Leftrightarrow z$ то для рассматриваемой задачи о колебаниях ферромагнитного диска вектор индукции Виллари \vec{B}^V полностью определяется аксиальным компонентом

$$B_z^V = -m_2 H_z^0 z F(\rho), \quad (2.33)$$

где $H_z^0 = B_z^0 / \mu_{33}^e$ – аксиальный компонент вектора напряженности постоянного магнитного поля в объеме ферромагнитного диска; μ_{33}^e – магнитная проницаемость (компонент тензора второго ранга) в направлении поля подмагничивания; $z F(\rho) = z \{ \partial^2 w(\rho) / \partial \rho^2 + [\partial w(\rho) / \partial \rho] / \rho \}$ – функция распределения объемной деформации по радиусу ρ и по толщине z колеблющегося диска.

Переменная магнитная индукция Виллари формирует в объеме токопроводящего диска низкочастотное электромагнитное поле, характеристики которого должны подчиняться уравнениям Максвелла. В пренебрежении токами смещения эти уравнения записываются в виде:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E}, \quad (2.34)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -i\omega \vec{B}, \quad (2.35)$$

где \vec{H} и \vec{E} – амплитудные значения векторов напряженности магнитного и электрического полей изменяющихся во времени по закону $e^{i\omega t}$; σ – удельная электрическая проводимость ферромагнетика (компонент тензора второго ранга со сферической указательной поверхностью); \vec{B} – вектор магнитной индукции в объеме деформируемого, предварительно намагниченного, ферромагнетика. В рамках линейного приближения [61, с.43] m -ый компонент вектора \vec{B} определяется следующим образом: $B_m = B_m^V + \mu_{mk}^e H_k$, где μ_{mk}^e – компонент тензора

магнитной проницаемости, экспериментально определяемый в режиме постоянства (нулевой) механической деформации в объеме ферромагнетика; H_k – амплитудное значение вектора напряженности внутреннего магнитного поля k -ого компонента, изменяющегося во времени по закону $e^{i\omega t}$, которое обусловлено вращением магнитных доменов в объеме деформируемого ферромагнетика.

Принимая во внимание последнее определение, систему уравнений Максвелла (2.34) и (2.35) можно свернуть в одно уравнение и записать его в виде:

$$\left[\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H} \right]_m + i\omega \mu_m^\varepsilon H_k = -i\omega \sigma B_m^V, \quad (2.36)$$

где запись $\left[\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{H} \right]_m$ означает m -ый компонент вектора.

Так как изгибные колебания диска обладают осевой симметрией, то окружной компонент вектора напряженности переменного магнитного поля $H_\phi = 0$ и производные $\partial/\partial\phi$ от любой характеристики этого поля также равны нулю. Учитывая эти обстоятельства, получаем из общей записи (2.36) следующую систему уравнений в частных производных

$$-\frac{\partial^2 H_\rho}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial \rho \partial z} + i\omega \mu_{11}^\varepsilon H_\rho = 0, \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial^2 H_\rho}{\partial \rho \partial z} - \frac{\partial^2 H_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial H_\rho}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right) + i\omega \mu_{33}^\varepsilon H_z = -i\omega \sigma B_z^V, \quad (2.38)$$

где μ_{11}^ε – магнитная проницаемость при перпендикулярной ориентации постоянного поля подмагничивания.

Конструкция правой части уравнения (2.38), определенная выражением (2.33), позволяет предположить, что решение системы уравнений (2.37) и (2.38) можно искать в виде:

$$H_\rho(\rho, z) = \sum_{k=0}^{\infty} H_\rho^{(k)}(\rho) \cos(\alpha_k z)$$

$$H_z(\rho, z) = \sum_{k=0}^{\infty} H_z^{(k)}(\rho) \sin(\alpha_k z), \quad (2.39)$$

где $\alpha_k = \pi(1 + 2k)/(2h)$.

Подставляя предполагаемое решение (2.39) в уравнение (2.37), получаем:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \left[H_{\rho}^{(k)}(\rho) \left(\alpha_k^2 + i\omega\sigma\mu_{11}^{\varepsilon} \right) + \alpha_k \frac{\partial H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho} \right] \cos(\alpha_k z) = 0,$$

откуда следует, что:

$$H_{\rho}^{(k)}(\rho) = -\frac{\alpha_k}{\xi_k^2} \frac{\partial H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho}, \quad (2.40)$$

где $\xi_k^2 = \alpha_k^2 + i\omega\sigma\mu_{11}^{\varepsilon}$.

Исключая с помощью соотношения (2.40) радиальный компонент $H_{\rho}^{(k)}(\rho)$ из уравнения (2.38), приводим его к виду:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{\xi_k^2} \left[\frac{\partial^2 H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho} - \zeta_k^2 H_z^{(k)}(\rho) \right] \sin(\alpha_k z) = \frac{1}{\mu_{11}^{\varepsilon}} B_z^V, \quad (2.41)$$

где $\zeta_k^2 = \mu_{33}^{\varepsilon} \xi_k^2 / \mu_{11}^{\varepsilon}$.

Так как функции $\sin(\alpha_k z)$ образуют на интервале $-h \leq z \leq h$ систему ортогональных функций, т. е. выполняются условия

$$\int_{-h}^h \sin(\alpha_k z) \sin(\alpha_m z) dz = \begin{cases} 0 & \forall k \neq m, \\ h & \text{at } k = m, \end{cases}$$

то это позволяет переписать уравнение (2.41) в более удобном для дальнейших вычислений виде

$$\frac{\partial^2 H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^{(k)}(\rho)}{\partial \rho} - \zeta_k^2 H_z^{(k)}(\rho) = -J_k(\rho), \quad (2.42)$$

где $J_k = \frac{8(-1)^k h \xi_k^2 m_2 H_z^0}{[\pi(1 + 2k)]^2 \mu_{11}^{\varepsilon}} F(\rho)$.

Умножением на ρ^2 уравнение (2.42) приводится к безразмерному, относительно аргумента искомой функции $H_z^{(k)}$, виду:

$$x_k^2 \frac{\partial^2 H_z^{(k)}}{\partial x_k^2} + x_k \frac{\partial H_z^{(k)}}{\partial x_k} - x_k^2 H_z^{(k)} = -\frac{x_k^2}{\zeta_k^2} J_k(\rho), \quad (2.43)$$

где $x_k = \zeta_k \rho$ – безразмерное волновое число.

Решение неоднородного обыкновенного дифференциального уравнения (2.43) отыскивается по стандартной схеме вариации постоянных [64], и записывается в виде:

$$H_z^{(k)}(x_k) = [A_k + A_k(x_k)] I_0(x_k) + B_k(x_k) K_0(x_k), \quad (2.44)$$

где A_k — подлежащий определению коэффициент, который обеспечивает единственность общего решения уравнения (2.43) с нулевой правой частью; $A_k(x_k)$ и $B_k(x_k)$ — варьируемые коэффициенты (функции), определяющие частное решение уравнения (2.43); $I_0(x_k)$ и $K_0(x_k)$ — модифицированная функция Бесселя и функция Макдональда [57, с.195] нулевого порядка.

Варьируемые коэффициенты $A_k(x_k)$ и $B_k(x_k)$ должны удовлетворять условию:

$$A'_k(x_k) I_0(x_k) + B'_k(x_k) K_0(x_k) = 0, \quad (2.45)$$

что обеспечивает минимум вычислений при решении неоднородного уравнения (2.43). Штрихами в условии (2.45) обозначены первые производные по переменной x_k .

Принимая во внимание условие (2.45), вычисляются первая и вторая производные искомой функции $H_z^{(k)}(x_k)$. Подставляя эти производные и предполагаемый вид решения (2.44) в уравнение (2.43), получаем:

$$A'_k(x_k) I_1(x_k) - B'_k(x_k) K_1(x_k) = -\frac{1}{\zeta_k^2} J_k(\rho). \quad (2.46)$$

Условие (2.45) и соотношение (2.46) образуют алгебраическую систему уравнений, которая разрешается единственным образом относительно искомых величин $A'_k(x_k)$ и $B'_k(x_k)$. Интегрируя полученные результаты, приходим к выражениям для расчета варьируемых коэффициентов $A'_k(x_k)$ и $B'_k(x_k)$:

$$A_k(x_k) = -\frac{1}{\zeta_k^2} \int_0^{x_k} x J_k(\rho) K_0(x) dx, \quad B_k(x_k) = \frac{1}{\zeta_k^2} \int_0^{x_k} x J_k(\rho) I_0(x) dx, \quad (2.47)$$

где $x \equiv x_k$. После определения варьируемых констант можно записать, что:

$$H_z^{(k)}(\zeta_k \rho) = A_k I_0(\zeta_k \rho) + Z_k(\zeta_k \rho), \quad (2.48)$$

$$H_\rho^{(k)}(\zeta_k \rho) = -\frac{\alpha_k \zeta_k}{\xi_k^2} [A_k I_1(\zeta_k \rho) + R_k(\zeta_k \rho)], \quad (2.49)$$

где A_k — подлежащие определению константы; функции $Z_k(\zeta_k \rho)$ и $R_k(\zeta_k \rho)$ определяются следующими соотношениями:

$$Z_k(\zeta_k \rho) = A_k(\zeta_k \rho) I_0(\zeta_k \rho) + B_k(\zeta_k \rho) K_0(\zeta_k \rho) = H_0 p_k F_z^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho),$$

$$R_k(\zeta_k \rho) = A_k(\zeta_k \rho) I_1(\zeta_k \rho) - B_k(\zeta_k \rho) K_1(\zeta_k \rho) = H_0 p_k F_\rho^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho);$$

$$H_0 = U_0 H_z^0 \frac{h m_2}{\mu_{33}^\varepsilon R_0^2}; \quad p_k = \frac{8(-1)^k}{[\pi(1+2k)]^2};$$

$$F_z^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho) = \frac{(\lambda \zeta_k)^2 R_0^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)} \left\{ (\lambda^2 - \zeta_k^2) I_1(\lambda R_0) \right.$$

$$\left. [I_0(\zeta_k \rho) - J_0(\lambda \rho)] + (\lambda^2 + \zeta_k^2) J_1(\lambda R_0) [I_0(\zeta_k \rho) - I_1(\lambda \rho)] \right\};$$

$$F_\rho^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho) = \frac{(\lambda \zeta_k)^2 R_0^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)}$$

$$\left. \left\{ (\lambda^2 - \zeta_k^2) I_1(\lambda R_0) \left[\frac{\lambda}{\zeta_k} J_1(\lambda \rho) + I_1(\zeta_k \rho) \right] - (\lambda^2 + \zeta_k^2) J_1(\lambda R_0) \left[\frac{\lambda}{\zeta_k} I_1(\lambda \rho) - I_1(\zeta_k \rho) \right] \right\} \right\}.$$

Константы A_k должны обеспечивать абсолютную сходимость рядов (2.39).

Необходимым признаком сходимости этих рядов является удовлетворение предельным условиям $\lim_{k \rightarrow \infty} H_\beta^{(k)}(\zeta_k \rho) = 0$, где $\beta = \rho; z$. Достаточным признаком является конечное значение сумм функций $H_\beta^{(k)}(\zeta_k \rho)$ при $k \rightarrow \infty$. Оба признака будут присутствовать в соотношениях для расчета компонентов вектора напряженности переменного магнитного поля в колеблющемся диске только лишь в том случае, когда:

$$A_k = -\frac{(\lambda \zeta_k)^2 (\zeta_k R_0)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)} [J_1(\lambda R_0) - I_1(\lambda R_0)]. \quad (2.50)$$

В этом случае выражения (2.48) и (2.49) принимают следующий вид:

$$H_z^{(k)}(\zeta_k \rho) = H_0 p_k W_z^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho), \quad H_\rho^{(k)}(\zeta_k \rho) = -H_0 p_k \frac{\alpha_k \zeta_k}{\xi_k^2} W_\rho^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho), \quad (2.51)$$

где

$$W_z^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho) = \frac{(\lambda \zeta_k)^2 (\lambda R_0)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)} [J_0(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - J_1(\lambda R_0) I_0(\lambda \rho)];$$

$$W_\rho^{(k)}(\lambda, \zeta_k, \rho) = \frac{(\lambda \zeta_k)^2 (\lambda R_0)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) D(\lambda R_0)} \frac{\lambda}{\zeta_k} [J_1(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - J_1(\lambda R_0) I_1(\lambda \rho)].$$

Таким образом, искомые компоненты вектора напряженности переменного магнитного поля в объеме колеблющегося ферромагнитного диска определяются следующими, абсолютно сходящимися, рядами:

$$H_z(\rho, z) = H_0 W_z(\lambda, \rho, R_0) \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{(\lambda \zeta_k)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4)} \sin(\alpha_k z),$$

$$H_\rho(\rho, z) = -H_0 W_\rho(\lambda, \rho, R_0) \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{\alpha_k \lambda (\lambda \zeta_k)^2}{\zeta_k^2 (\lambda^4 - \zeta_k^4)} \cos(\alpha_k z), \quad (2.52)$$

где

$$W_z(\lambda, \rho, R_0) = \frac{(\lambda R_0)^2}{D(\lambda R_0)} [J_0(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - J_1(\lambda R_0) I_0(\lambda \rho)],$$

$$W_\rho(\lambda, \rho, R_0) = \frac{(\lambda R_0)^2}{D(\lambda R_0)} [J_1(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - J_1(\lambda R_0) I_1(\lambda \rho)].$$

Полученные формулы переменной напряженности магнитного поля, позволяют получить информацию об электромагнитной среде, образованной колеблющимся ферромагнитным диском.

2.4.2 Определение параметров переменного магнитного поля, создаваемого вибрирующим ферромагнитным диском

Источниками низкочастотных электромагнитных помех могут быть металлические элементы радиоэлектронной аппаратуры, которые совершают механические колебания в присутствии постоянного магнитного поля.

Ниже на примере колеблющегося ферромагнитного диска, рассмотрены последовательности вычислительных процедур, которые позволяют определить амплитуду переменной намагниченности вибрирующего диска и уровни переменного магнитного поля в окружающем пространстве.

Изменяющаяся во времени по закону $e^{i\omega t}$ намагниченность колеблющегося ферромагнитного диска формирует в окружающем пространстве

переменное электромагнитное поле, описываемое уравнениями Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}}^e = i\omega \epsilon_0 \vec{\mathbf{E}}^e, \quad (2.53)$$

$$\operatorname{rot} \vec{\mathbf{E}}^e = -i\omega \mu_0 \vec{\mathbf{H}}^e, \quad (2.54)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – диэлектрическая и магнитная постоянные; $\vec{\mathbf{H}}^e$ и $\vec{\mathbf{E}}^e$ – амплитудные значения изменяющихся во времени по закону $e^{i\omega t}$ векторов напряженности магнитной и электрической составляющей электромагнитного поля.

Из уравнений (2.53) и (2.54) следует, что

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}}^e - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \vec{\mathbf{H}}^e = 0. \quad (2.55)$$

На частотах звукового диапазона $\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 \ll 1$, и уравнение (2.55) принимает вид

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{\mathbf{H}}^e = 0. \quad (2.56)$$

Решение уравнения (2.56) на поверхностях диска $z = \pm h$ должно обеспечивать выполнение граничных условий

$$H_\rho^e(\rho, \pm h) = 0 \quad \forall \rho \leq R_0. \quad (2.57)$$

$$\mu_0 H_\rho^e(\rho, \pm h) - B_z(\rho, \pm h) = 0 \quad \forall \rho \leq R_0, \quad (2.58)$$

где $B_z(r, z) = B_z^V(r, z) + m_{33}^e H_z(r, z)$ – магнитная индукция в объеме колеблющегося ферромагнитного диска; компонент $H_z(\rho, z)$ определен выражением:

$$H_z(\rho, z) = H_0 W_z(\lambda, \rho, R_0) \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{(\lambda \zeta_k)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4)} \sin(\alpha_k z).$$

Решение уравнения (2.56) целесообразно выполнить в сферической системе координат (ϑ, ϕ, r) , координатные линии которой показаны на рисунке 2.6.

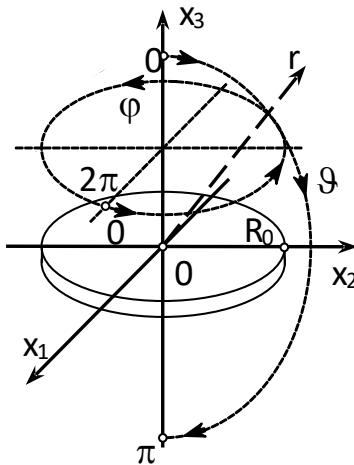


Рисунок 2.6 – Декартовая и сферическая системы координат

Для определения характеристик поля в полупространстве $x_3 \geq h$ будет использована сферическая система координат, начало которой совмещено с центром верхней поверхности ферромагнитного диска. Для переменного магнитного поля в полупространстве $x_3 \leq -h$, начало сферической системы координат совмещено с центром нижней ($z = -h$) поверхности диска.

Магнитное поле в окрестности колеблющегося диска не зависит от азимутальной координаты φ , поэтому векторное уравнение (2.56) распадается на два скалярных уравнения:

$$\frac{\operatorname{ctg} \vartheta}{r} \left[\frac{1}{r} H_\vartheta^e + \frac{\partial H_\vartheta^e}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r^e}{\partial \vartheta} \right] + \frac{1}{r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial H_\vartheta^e}{\partial \vartheta} + \frac{\partial^2 H_\vartheta^e}{\partial \vartheta \partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 H_r^e}{\partial \vartheta^2} \right] = 0. \quad (2.59)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial H_\vartheta^e}{\partial r} \right) - r \frac{\partial^2 H_r^e}{\partial \vartheta \partial r} = 0, \quad (2.60)$$

где $H_\vartheta^e(\vartheta, r)$ и $H_r^e(\vartheta, r)$ – амплитудные значения полярного и радиального компонентов вектора $\vec{H}^e(\vartheta, r)$ напряженности осесимметричного переменного магнитного поля в окрестности колеблющегося ферромагнитного диска.

Из условия отсутствия магнитных зарядов, т. е. условия $\operatorname{div} \vec{H}^e = 0$, следует, что между компонентами вектора $\vec{H}^e(\vartheta, r)$ существует линейная зависимость, т. е.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 H_r^e \right) = - \left[\operatorname{ctg} \vartheta H_\vartheta^e + \frac{\partial H_\vartheta^e}{\partial \vartheta} \right]. \quad (2.61)$$

С помощью соотношения (2.61) можно исключить из уравнения (2.59) компонент $H_g^e(9, r)$ и его производные по переменным r и 9 . После этого уравнение (2.59) принимает вид

$$\frac{\partial^2 H_r^e}{\partial r^2} + \frac{4}{r} \frac{\partial H_r^e}{\partial r} + \frac{2}{r^2} H_r^e + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 H_r^e}{\partial 9^2} + \operatorname{ctg} 9 \frac{\partial H_r^e}{\partial 9} \right) = 0. \quad (2.62)$$

Следуя общепринятым методом разделения переменных [65], решение уравнения (2.62) можно представить в виде

$$H_r^e(9, r) = T(9)R(r), \quad (2.63)$$

где $T(9)$ и $R(r)$ – подлежащие определению функции.

Подставляя соотношение (2.63) в уравнение (2.62), получаем

$$T(9)FR(r) + \frac{R(r)}{r^2}FT(9) = 0, \quad (2.64)$$

где $FR(r) = \frac{\partial^2 R}{\partial r^2} + \frac{4}{r} \frac{\partial R}{\partial r} + \frac{2}{r^2} R$, $FT(9) = \frac{\partial^2 T}{\partial 9^2} + \operatorname{ctg} 9 \frac{\partial T}{\partial 9}$.

Рассмотрим функцию $FT(9)$. Для функции $FT(9)$ перейдем к новой переменной $\xi = \cos 9$, тогда:

$$FT(\xi) = - \left[(\xi^2 - 1) \frac{\partial^2 T(\xi)}{\partial \xi^2} + 2\xi \frac{\partial T(\xi)}{\partial \xi} \right]. \quad (2.65)$$

Добавим и вычтем в правой части выражения (2.65) комбинацию $v(v+1)T(\xi)$, где $v = 0, 1, 2, \dots$ – элемент ряда натуральных чисел. Выражение (2.65) принимает вид:

$$FT(\xi) = - \left[(\xi^2 - 1) \frac{\partial^2 T(\xi)}{\partial \xi^2} + 2\xi \frac{\partial T(\xi)}{\partial \xi} - v(v+1)T(\xi) \right] - v(v+1)T(\xi). \quad (2.66)$$

В квадратной скобке выражения (2.66) записано уравнение Лежандра [66]. Если представить $T(\xi) = P_v(\xi)$, где $P_v(\xi)$ – функция Лежандра первого рода степени v , то квадратная скобка в соотношении (2.66) обращается в нуль, а уравнение (2.64) имеет вид:

$$\sum_v P_v(\xi) \left[\frac{\partial^2 R_v(r)}{\partial r^2} + \frac{4}{r} \frac{\partial R_v(r)}{\partial r} + \frac{2}{r^2} R_v(r) - \frac{v(v+1)}{r^2} R_v(r) \right] = 0 \quad (2.67)$$

Известно [57, с.154], что функции Лежандра четных степеней ν не обращаются в нуль при $\xi = 0$. Функции Лежандра нечетных степеней ν , напротив, при $\vartheta = \pi/2$ ($\xi = 0$) принимают нулевые значения. Для того, чтобы определиться с символом ν в уравнении (2.67) примем во внимание то, что компоненты вектора напряженности \vec{H}^e переменного магнитного поля в окрестности колеблющегося диска в цилиндрической системе координат выразим через компоненты $H_r^e(r, \vartheta)$ и $H_\vartheta^e(r, \vartheta)$:

$$H_z^e = H_r^e \cos \vartheta - H_\vartheta^e \sin \vartheta,$$

$$H_\rho^e = H_r^e \sin \vartheta - H_\vartheta^e \cos \vartheta.$$

Для того, чтобы обеспечить выполнение граничного условия (2.57), т. е. $H_\rho^e(\rho, h) = 0$, необходимо и достаточно положить в уравнении (2.67) значок $\nu = 1 + 2m$, где $m = 0, 1, 2, \dots$.

Очевидно, что сумма знакопеременного ряда (2.67) равна нулю, когда

$$\frac{\partial^2 R_m(r)}{\partial r^2} + \frac{4}{r} \frac{\partial R_m(r)}{\partial r} + \frac{2}{r^2} R_m(r) - \frac{\nu(\nu+1)}{r^2} R_m(r) = 0, \quad (2.68)$$

где $\nu = 1 + 2m$.

Для удобства выполнения дальнейших вычислений, представим уравнение (2.68) в безразмерном, относительно аргумента искомой функции R_m , виде:

$$x^2 \frac{\partial^2 R_m(x)}{\partial x^2} + 4x \frac{\partial R_m(x)}{\partial x} + [2 - \nu(\nu+1)] R_m(x) = 0, \quad (2.69)$$

где $x = r/R_0$ – безразмерная радиальная координата; R_0 – радиус колеблющегося диска.

Подстановкой $R_m(x) = x^{-3/2} U_m(x)$ уравнение (2.69) приводится к стандартному уравнению Эйлера [66, с.119] относительно функции $U_m(x)$. Уравнение Эйлера:

$$x^2 \frac{\partial^2 U_m(x)}{\partial x^2} + x \frac{\partial U_m(x)}{\partial x} - (2m + 3/2)^2 U_m(x) = 0$$

имеет своим общим решением функцию

$$U_m(x) = C_m x^{2m+3/2} + D_m x^{-(2m+3/2)}, \quad (2.70)$$

где C_m и D_m – подлежащие определению константы. Очевидно, что во внутренней области $0 \leq x \leq 1$, т. е. внутри полусферы радиуса R_0 , функция $U_m(x) = U_m^{(-)}(x) = C_m x^{2m+3/2}$. Во внешней области $x > 1$ функция $U_m(x) = U_m^{(+)}(x) = D_m x^{-(2m+3/2)}$. На поверхности полусферы $x = 1$ должно выполняться равенство $U_m^{(-)}(1) = U_m^{(+)}(1)$, откуда следует, что $C_m = D_m$.

Искомая функция $R_m(x)$ может быть найдена следующим образом:

$$R_m(x) = \begin{cases} C_m x^{2m} & \forall x \in [0, 1], \\ C_m x^{-(2m+3)} & \forall x > 1. \end{cases}$$

Таким образом, искомый радиальный компонент $H_r^e(r, \vartheta)$ задается выражением:

$$H_r^e(r, \vartheta) = \begin{cases} \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left(\frac{r}{R_0} \right)^{2m} P_{1+2m}(\xi) & \forall r \in [0, R_0], \\ \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-(2m+3)} P_{1+2m}(\xi) & \forall r > R_0. \end{cases} \quad (2.71)$$

Рассмотрим уравнение (2.60). Очевидно, что его можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(x^2 \frac{\partial H_g^e}{\partial x} \right) = x \frac{\partial^2 H_g^e}{\partial x \partial \vartheta}. \quad (2.72)$$

Решение уравнения (2.72) осуществляется последовательным интегрированием правой части по переменной x .

Для внутренней области $0 \leq x \leq 1$ имеем

$${}^{(-)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left[\frac{x^{2m}}{2m+1} - \frac{q_1^{(m)}}{x} + q_2^{(m)} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi},$$

где $q_1^{(m)}$ и $q_2^{(m)}$ – константы интегрирования. Очевидно, что $q_1^{(m)} = 0$ и

$${}^{(-)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left[\frac{1}{2m+1} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{2m} + q_2^{(m)} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \quad \forall r \in [0, R_0]. \quad (2.73)$$

Для области $r > R_0$ формула для расчета полярного компонента вектора напряженности переменного магнитного поля имеет вид

$${}^{(+)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left[-\frac{x^{-(2m+3)}}{2m+2} - \frac{q_3^{(m)}}{x} + q_4^{(m)} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi},$$

где $q_3^{(m)}$ и $q_4^{(m)}$ – константы интегрирования. Очевидно, что $q_4^{(m)} = 0$ и

$${}^{(+)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} C_m \left[-\frac{1}{2m+2} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-(2m+3)} - \frac{q_3^{(m)}}{(r/R_0)} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \quad \forall r > R_0. \quad (2.74)$$

Постоянные интегрирования $q_2^{(m)}$ и $q_3^{(m)}$ находят—из условий сопряжения решений на поверхности полусферы $x = 1$

$${}^{(-)}H_g^e(1, \vartheta) = {}^{(+)}H_g^e(1, \vartheta), \frac{\partial}{\partial x} {}^{(-)}H_g^e(x, \vartheta) \Big|_{x=1} = \frac{\partial}{\partial x} {}^{(+)}H_g^e(x, \vartheta) \Big|_{x=1},$$

откуда следует, что $q_2^{(m)} = 0$ и $q_3^{(m)} = -\frac{4m+3}{(2m+1)(2m+2)}$. С учетом этого соотношения

(2.73) и (2.74) принимают вид:

$${}^{(-)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} \frac{C_m}{2m+1} \left(\frac{r}{R_0} \right)^{2m} \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \quad \forall r \in [0, R_0], \quad (2.75)$$

$${}^{(+)}H_g^e(r, \vartheta) = -\sin \vartheta \sum_{m=0}^{\infty} \frac{C_m}{2m+2} \left[-\left(\frac{r}{R_0} \right)^{-(2m+3)} + \left(\frac{4m+3}{2m+1} \right) \left(\frac{r}{R_0} \right)^{-1} \right] \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \quad \forall r > R_0. \quad (2.76)$$

Выражения (2.71) и (2.75) обеспечивают автоматическое выполнение граничного условия (2.57). Соответствующим подбором констант C_m можно обеспечить приближенное выполнение условий (2.58).

Входящий в состав условия (2.58) аксиальный компонент вектора магнитной индукции $B_z(\rho, h)$ запишем в виде

$$B_z(\rho, h) = B_z^V(\rho, h) + \mu_{33}^e H_z(\rho, h) = B_0 \psi \left[J_0(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - I_0(\lambda \rho) J_1(\lambda R_0) \right], \quad (2.77)$$

$$\text{где } B_0 = U_0 H_z^0 \frac{h m_2 \lambda^2}{D(\lambda R_0)}; \psi = 1 + \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{(-1)^k (\lambda \zeta_k)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4)}.$$

Известно [57, с.177], что функции Бесселя $J_0(q_n x)$, где q_n – n -ый корень уравнения $J_0(z) = 0$ (n -ый нуль функции Бесселя нулевого порядка), образуют систему ортогональных функций на интервале $0 \leq x \leq 1$, т. е. существует интеграл

$$\int_0^1 x J_0(q_k x) J_0(q_n x) dx = \begin{cases} 0 & \forall k \neq n, \\ J_1^2(q_n)/2 & \text{при } k = n. \end{cases} \quad (2.78)$$

Соотношения (2.78) позволяют записать выражение (2.77) в виде

$$B_z(\rho, h) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_0(q_n x), \quad (2.79)$$

$$\text{где } B_n = B_0 \psi \frac{q_n}{J_1(q_n)} \left[\frac{I_1(\lambda R_0) J_0(\lambda R_0)}{(\lambda R_0)^2 - q_n^2} - \frac{I_0(\lambda R_0) J_1(\lambda R_0)}{(\lambda R_0)^2 + q_n^2} \right].$$

При этом граничные условия (2.58) принимают вид

$$2 \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_0(q_n x) = \mu_0 \sum_{m=0}^{\infty} C_m (-1)^m \frac{(2m)!}{4^m (m!)^2} x^{2m}, \quad (2.80)$$

$$\text{где } \left[\sin \vartheta \frac{\partial P_{1+2m}(\xi)}{\partial \xi} \right]_{\xi=0} = (2m+1)(-1)^m \frac{(2m)!}{4^m (m!)^2}.$$

Умножим левую и правую части равенства (2.80) на произведение $x J_0(q_n x)$ и проинтегрируем полученные результаты по переменной x в пределах от нуля до единицы. После выполнения этих действий можно записать, что

$$\sum_{m=0}^{\infty} C_m \beta_{mn} = \frac{B_n}{\mu_0}, \quad (2.81)$$

$$\text{где } \beta_{mn} = (-1)^m \frac{(2m)!}{4^m (m!)^2 J_1^2(q_n)} \int_0^1 x^{2m+1} J_0(q_n x) dx.$$

Уравнение (2.81) позволяет приближенно определить первые $M+1$ коэффициентов C_m . Действительно, равенство (2.81) можно приближенно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} C_0 \beta_{01} + C_1 \beta_{11} + C_2 \beta_{21} + \dots + C_M \beta_{M1} &= B_1 / \mu_0, \\ C_0 \beta_{02} + C_1 \beta_{12} + C_2 \beta_{22} + \dots + C_M \beta_{M2} &= B_2 / \mu_0, \\ C_0 \beta_{03} + C_1 \beta_{13} + C_2 \beta_{23} + \dots + C_M \beta_{M3} &= B_3 / \mu_0, \\ &\dots \\ C_0 \beta_{0n} + C_1 \beta_{1n} + C_2 \beta_{2n} + \dots + C_M \beta_{Mn} &= B_n / \mu_0, \\ C_0 \beta_{0M} + C_1 \beta_{1M} + C_2 \beta_{2M} + \dots + C_M \beta_{MM} &= B_M / \mu_0 \end{aligned} \quad (2.82)$$

где $M = n + 1$.

Система линейных алгебраических уравнений (2.82) разрешена относительно искомых констант $C_0, C_1, C_2, \dots, C_M$ единственным образом и обеспечивает получение данных об электромагнитной обстановки создаваемой ферромагнитным диском постоянного магнитного поля.

2.5 Метод определения уровня низкочастотных помех, вызванных ферромагнитным компонентом на печатной плате

Методы расчета помех на элементах печатных плат, а также рекомендации по проектированию печатных плат можно найти в многочисленных публикациях, например [67, 68, 69].

В данном подразделе выполнена оценка взаимодействия колеблющихся частей электронного оборудования в сложной электромагнитной среде с проводниками печатной платы с точки зрения электромагнитной совместимости. Впервые, рассчитаны магнитные потоки, которые проходят через замкнутый контур, образованный печатными проводниками на платах электроники.

Показано влияние колеблющегося ферромагнитного диска как источника помех на плоскую печатную форму кольца проводника. По теореме о наведенном магнитном потоке получена количественная оценка электродвижущей силы и частотной характеристики печатного проводника в режиме регистрации низкочастотных электромагнитных помех. Полученные результаты выявили важный фактор в формировании непреднамеренных электромагнитных помех и представляют практический интерес при проектировании чувствительного оборудования.

2.5.1 Применение теоремы о наведенном магнитном потоке

По известным, построенным по методике, изложенной в п. 2.4.2, компонентам вектора напряженности магнитного поля рассеяния можно рассчитать потоки магнитной индукции, которые пронизывают замкнутые контура образованные печатными проводниками на платах радиоэлектронной аппаратуры. После определения магнитного потока $\Phi_j(t)$ через j -й контур, рассчитывается электродвижущая сила $U_j^0(t) = -\partial\Phi_j(t)/\partial t$ в j -ом замкнутом контуре на печатной плате. Если полный электрический импеданс радиоэлектронных компонентов, которые последовательно включены в разрывы

j -ой замкнутой петли печатного проводника обозначить символом Z_j^n , а входное сопротивление активного элемента в той же петле – символом Z_j^a , то уровень низкочастотной помехи U_j^{nu} в j -ом контуре печатной платы определяется очевидным соотношением

$$U_j^{nu} = U_j^0 Z_j^a / Z_j^n \quad (2.83)$$

Помимо указанного выше, обладающего физической наглядностью, способа определения потока магнитной индукции $\Phi_j(t)$ и, как следствие, электродвижущей силы $U_j^0(t)$, существует альтернативная вычислительная процедура, основанная на использовании теоремы о наведенном магнитном потоке.

Математическую формулировку теоремы о наведенном магнитном потоке можно записать в следующем виде

$$\Phi_j(t) = \mu_0 \iiint_V \vec{M}(x_k, t) \cdot \vec{\Psi}^{(j)}(x_k) dV, \quad (2.84)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\vec{M}(x_k, t)$ – изменяющийся во времени вектор намагниченности ферромагнетика в точке с координатами x_k , которая принадлежит объему V ферромагнитного образца (в настоящем изложении – колеблющегося диска); $\vec{\Psi}^{(j)}(x_k)$ – векторная функция, которая задает пространственное распределение постоянного во времени магнитного поля, которое может сформировать j -ый замкнутый контур в вакууме, в точке с теми же координатами x_k , если по нему пропустить постоянный электрический ток $I^{(j)}$. При этом вектор напряженности постоянного магнитного поля j -ого контура $\vec{H}^{(j)}(x_k) = I^{(j)} \vec{\Psi}^{(j)}(x_k)$. Если намагниченность ферромагнетика изменяется во времени по гармоническому закону $e^{i\omega t}$, т. е. $\vec{M}(x_k, t) = \vec{M}(x_k) e^{i\omega t}$, то амплитудное значение U_j^0 электродвижущей силы $U_j^0(t) = U_j^0 e^{i\omega t}$ определяется, в общем случае, следующим выражением

$$U_j^0 = -i\omega \mu_0 \iiint_V \vec{M}(x_k) \cdot \vec{\Psi}^{(j)}(x_k) dV, \quad (2.85)$$

где $\vec{M}(x_k)$ – амплитудное значение намагниченности в точке с координатами x_k .

Рассмотрим практическое применение соотношения (2.85) на простейшем, в смысле объема вычислений, модельном примере плоского печатного проводника кольцевой формы, который располагается соосно над ферромагнитным диском (рисунок 2.7).

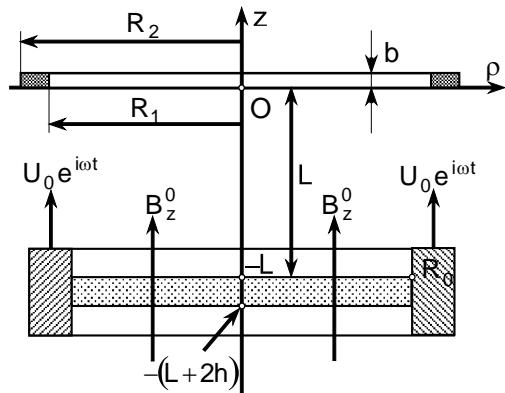


Рисунок 2.7 – Расчетная схема задачи о расчете электродвижущей силы в кольцевом печатном проводнике

Диск совершает осесимметричные колебания поперечного изгиба в постоянном магнитном поле. Печатный проводник имеет малую, но конечную толщину b , его ширина определяется радиусами R_1 и R_2 , и он расположен на расстоянии L над поверхностью колеблющегося диска. Для удобства последующих вычислений, начало цилиндрической системы координат (ρ, φ, z) помещается на нижней поверхности печатного проводника (рисунок 2.7). «Старая» система координат (ρ', φ', z') , в которой было определено магнитное состояние колеблющегося диска (п. 2.4.1), соотносится с указанной на рисунке 2.7 системой координат следующим образом: $\rho' = \rho$; $\varphi' = \varphi$; $z' = z + (L + h)$, где h – половина толщины ферромагнитного диска.

Принимая во внимание осевую симметрию задачи, выражение (2.85) можно записать в виде

$$U^0 = -2\pi i\omega\mu_0 \int_0^{R_0} \int_{-(L+2h)}^{-L} \rho [M_\rho(\rho, z') \Psi_\rho(\rho, z) + M_z(\rho, z') \Psi_z(\rho, z)] d\rho dz, \quad (2.86)$$

где R_0 – радиус диска; индексы j в соотношении (2.86) и во всех последующих записях будут опущены, так как рассматривается один, вполне определенный, печатный проводник.

Для ферромагнетиков вектор намагниченности \vec{M} вне зависимости от поляризационных эффектов определяется следующим образом [70]:

$$\vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}, \quad (2.87)$$

где \vec{B} и \vec{H} – векторы индукции и напряженности магнитного поля в объеме ферромагнетика.

Следуя определению (2.87) и принимая во внимание результаты, полученные в первом разделе, можно записать, что

$$\begin{aligned} M_\rho(\rho, z') &= -(\mu_{11}^\varepsilon / \mu_0 - 1) H_0 W_\rho(\rho) W_\rho(z'), \\ M_z(\rho, z') &= H_0 W_z(\rho) W_z(z'), \end{aligned} \quad (2.88)$$

где

$$H_0 = U_0 H_z^0 \frac{h m_2}{\mu_{33}^\varepsilon R_0^2};$$

$$W_\rho(\rho) = \frac{(\lambda R_0)^2}{D_0(\lambda R_0)} [J_1(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - J_1(\lambda R_0) I_1(\lambda \rho)];$$

$$W_\rho(z') = \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{\lambda^3 \zeta_k^2 \alpha_k}{\xi_k^2 (\lambda^4 - \zeta_k^4)} \cos \alpha_k z';$$

$$W_z(\rho) = \frac{(\lambda R_0)^2}{D_0(\lambda R_0)} [J_0(\lambda \rho) I_1(\lambda R_0) - J_1(\lambda R_0) I_0(\lambda \rho)];$$

$$W_z(z') = \left(\frac{\mu_{33}^\varepsilon}{\mu_0} - 1 \right) \sum_{k=0}^{\infty} p_k \frac{(\lambda \zeta_k)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4)} \sin \alpha_k z' - \frac{\mu_{33}^\varepsilon}{\mu_0} \frac{z'}{h}.$$

Для того, чтобы определить величины $\Psi_\rho(\rho, z)$ и $\Psi_z(\rho, z)$ рассмотрим вспомогательную задачу (рисунок 2.8).

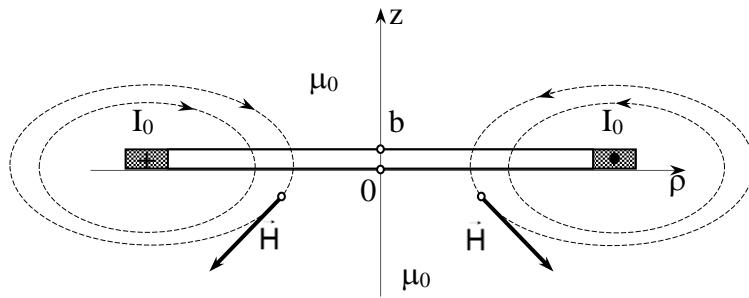


Рисунок 2.8 – Расчетная схема вспомогательной задачи

Предположим, что по замкнутому плоскому печатному проводнику протекает постоянный электрический ток I_0 . В окрестности проводника, который, согласно теореме, о наведенном магнитном потоке находится в вакууме, этот ток формирует постоянное магнитное поле, силовые линии которого показаны на рисунке 2.8 штриховыми замкнутыми кривыми. Вектор напряженности $\vec{H}(\rho, z)$ постоянного магнитного поля в каждой точке силовой линии совпадает по направлению с касательной к силовой линии в этой же точке.

2.5.2 Оценка напряжения помех на печатной плате

Из уравнений Максвелла следует, что $\operatorname{div} \vec{B} = 0$, где магнитная индукция $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$. Чтобы сохранить это аналитическое свойство векторов магнитной индукции и напряженности постоянного магнитного поля, введем векторный потенциал $\vec{A}(\rho, z)$ такой, что $\operatorname{rot} \vec{A} = \vec{B} = \mu_0 \vec{H}$. Из первого уравнения Максвелла $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}$ следует, что

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A} = \mu_0 \vec{J}, \quad (2.89)$$

где \vec{J} – вектор поверхностной плотности электрического тока, который существует в плоском кольцевом проводнике. Очевидно, что $\vec{J}(\rho, z) = \vec{e}_\phi J_\phi(\rho, z)$, где \vec{e}_ϕ – единичный орт окружности полярных углов цилиндрической системы координат;

$$J_\phi(\rho, z) = \frac{I_0}{(R_2 - R_1)b} f_1(\rho) f_2(z) \quad (2.90)$$

регуляторные функции $f_1(\rho)$ и $f_2(z)$ обладают следующими свойствами:

$$f_1(\rho) = \begin{cases} 1 & \forall \rho \in [R_1, R_2], \\ 0 & \forall \rho \notin [R_1, R_2], \end{cases} \quad f_2(z) = \begin{cases} 1 & \forall z \in [0, b], \\ 0 & \forall z \notin [0, b]. \end{cases}$$

Не составляет труда убедиться в том, что компоненты $H_\rho(\rho, z)$ и $H_z(\rho, z)$ вектора напряженности постоянного магнитного поля полностью определяются окружным компонентом $A_\phi(\rho, z)$ векторного потенциала. При этом уравнение (2.89) принимает вид

$$-\frac{\partial^2 A_\phi(\rho, z)}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 A_\phi(\rho, z)}{\partial \rho^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\phi(\rho, z)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} A_\phi(\rho, z) = \frac{I_0}{(R_2 - R_1)b} f_1(\rho) f_2(z) \quad (2.91)$$

Решение уравнения (2.91) должно удовлетворять условиям физической реализуемости источника поля, т. е. предельным условиям

$$\lim_{S \rightarrow \infty} \left\{ A_\phi(\rho, z); \frac{\partial A_\phi(\rho, z)}{\partial \rho}; \frac{\partial A_\phi(\rho, z)}{\partial z} \right\} = 0, \quad (2.92)$$

где $S = \sqrt{\rho^2 + z^2}$ – расстояние от кольцевого проводника.

Поскольку искомое решение уравнения (2.91) a priori удовлетворяет условиям (2.92), поскольку для решения уравнения (2.91) можно применить метод интегральных преобразований [65, с.609].

Определим интегральный образ $A_\phi(\gamma, z)$ искомой функции $A_\phi(\rho, z)$ как прямое интегральное преобразование Ханкеля следующего вида:

$$A_\phi(\gamma, z) = \int_0^\infty \rho A_\phi(\rho, z) J_1(\gamma \rho) d\rho, \quad (2.93)$$

где γ – параметр интегрального преобразования с размерностью 1/м, представляющий собой положительное действительное число, причем $\gamma \in [0, \infty)$; $J_1(\gamma \rho)$ – функция Бесселя первого рода, являющаяся ядром интегрального преобразования. Переход от интегрального образа $A_\phi(\gamma, z)$ к искомой функции $A_\phi(\rho, z)$ осуществляется с помощью обратного интегрального преобразования Ханкеля, которое можно определить следующим образом:

$$A_\phi(\rho, z) = \int_0^\infty \gamma A_\phi(\gamma, z) J_1(\gamma\rho) d\gamma. \quad (2.94)$$

Применяя преобразование Ханкеля (2.93) к обеим частям уравнения (2.91), получаем дифференциальное уравнение следующего вида:

$$-\frac{\partial^2 A_\phi(\gamma, z)}{\partial z^2} + \gamma^2 A_\phi(\gamma, z) = \mu_0 J_\phi(\gamma) f_2(z), \quad (2.95)$$

$$\text{где } J_\phi(\gamma) = \frac{I_0}{(R_2 - R_1)b} \int_0^\infty \rho f_1(\rho) J_1(\gamma\rho) d\rho = \frac{I_0}{(R_2 - R_1)b} \int_{R_1}^{R_2} \rho J_1(\gamma\rho) d\rho = \frac{I_0}{\gamma b} W(\gamma, R).$$

Функция $W(\gamma, R)$ определяет влияние радиальных размеров плоского печатного проводника на характер изменения в пространстве постоянного магнитного поля. Числовые значения функции $W(\gamma, R)$ задаются формулой

$$W(\gamma, R) = \frac{\pi}{2\gamma(R_2 - R_1)} \left[\Omega(\gamma R_2) - \frac{R_1}{R_2} \Omega(\gamma R_1) \right], \quad (2.96)$$

где $\Omega(\gamma R_j) = J_1(\gamma R_j) \mathbf{H}_0(\gamma R_j) - J_0(\gamma R_j) \mathbf{H}_1(\gamma R_j)$; $j = 1, 2$; $\mathbf{H}_\nu(\gamma R_j)$ – функция Струве [57, с.313] порядка $\nu = 0,1$, которая задается интегральным представлением

$$\mathbf{H}_\nu(x) = \frac{2(x/2)^\nu}{\sqrt{\pi} \Gamma(\nu + 1/2)} \int_0^{\pi/2} \sin(x \cos \vartheta) \sin^{2\nu} \vartheta d\vartheta, \quad (2.97)$$

где $\Gamma(\nu + 1/2)$ – гамма-функция [57, с.81]. Рассчитанные по формуле (2.97) графики функций Струве показаны на рисунке 2.9.

Действуя по стандартной технологии [64, с.324] решения неоднородных обыкновенных дифференциальных уравнений, получаем решение уравнения (2.95) в следующем виде

$$A_\phi(\gamma, z) = [A + A(z)] e^{\gamma z} + [B + B(z)] e^{-\gamma z}, \quad (2.98)$$

где A и B – константы; варьируемые константы $A(z)$ и $B(z)$ определяются расчетными формулами

$$A(z) = \frac{\mu_0 I_0}{2\gamma^2 b} W(\gamma, R) \int_{-\infty}^z e^{-\gamma x} f_2(x) dx = \frac{\mu_0 I_0}{2\gamma^2 b} W(\gamma, R) \int_0^z e^{-\gamma x} dx,$$

$$B(z) = -\frac{\mu_0 I_0}{2\gamma^2 b} W(\gamma, R) \int_{-\infty}^z e^{\gamma x} f_2(x) dx = -\frac{\mu_0 I_0}{2\gamma^2 b} W(\gamma, R) \int_0^z e^{\gamma x} dx . \quad (2.99)$$

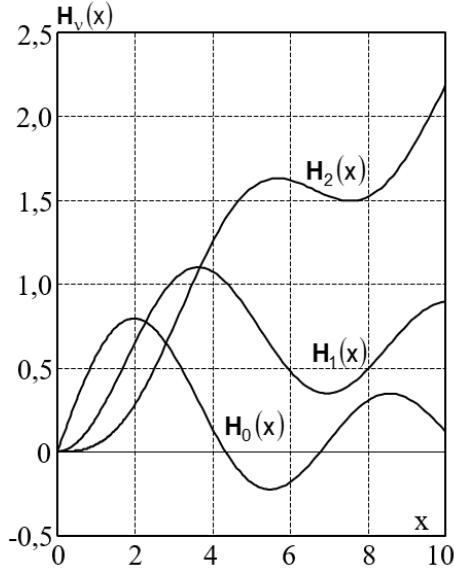


Рисунок 2.9 – Графики функций Струве

В формулах (2.99) $z \leq b$. Очевидно, что при $z < 0$, т. е. под плоским кольцевым проводником варьируемые константы $A(z)$ и $B(z)$ равны нулю.

Для того, чтобы решение (2.98) удовлетворяло предельным условиям (2.92) необходимо и достаточно положить константу $B = 0$, а константу A определить следующим образом:

$$A = A_0 = -A(b) = -\frac{\mu_0 I_0}{2\gamma^2 b} W(\gamma, R) \int_0^b e^{-\gamma x} dx = -\frac{\mu_0 I_0}{2\gamma^2} W(\gamma, \Gamma), \quad (2.100)$$

где $W(\gamma, \Gamma)$ – функция, которая определяет влияние геометрических параметров (символ Γ) печатного проводника на характер изменения магнитного поля в окружающем его пространстве. Функция $W(\gamma, \Gamma) = W(\gamma, R)W(\gamma b)$, где $W(\gamma b) = (1 - e^{-\gamma b})/(\gamma b)$.

Таким образом, в области $z < 0$, т. е. под печатным проводником, интегральный образ $A_\phi(\gamma, z)$ рассчитывается по формуле:

$$A_\phi(\gamma, z) = -\frac{\mu_0 I_0}{2\gamma^2} W(\gamma, \Gamma) e^{\gamma z}. \quad (2.101)$$

Из определения векторного потенциала $\vec{A}(\rho, z)$ следует, что $\vec{H} = \text{rot } \vec{A}/\mu_0$,

т. е.

$$H_\rho(\rho, z) = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\phi(\rho, z)}{\partial z}, \quad (2.102)$$

$$H_z(\rho, z) = \frac{1}{\mu_0} \left[\frac{1}{\rho} A_\phi(\rho, z) + \frac{\partial A_\phi(\rho, z)}{\partial \rho} \right]. \quad (2.103)$$

Определим интегральные образы компонентов вектора напряженности постоянного магнитного поля следующими соотношениями:

$$H_\rho(\gamma, z) = \int_0^\infty \rho H_\rho(\rho, z) J_1(\gamma\rho) d\rho, \quad (2.104)$$

$$H_z(\gamma, z) = \int_0^\infty \rho H_z(\rho, z) J_0(\gamma\rho) d\rho, \quad (2.105)$$

Воздействуя на определение (2.102) интегральным преобразованием (2.104), а на определение (2.103) – преобразованием (2.105), получаем следующие результаты:

$$H_\rho(\gamma, z) = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_\phi(\gamma, z)}{\partial z} = \frac{I_0}{2\gamma} W(\gamma, \Gamma) e^{\gamma z} \quad (2.106)$$

$$H_z(\gamma, z) = \frac{1}{\mu_0} \gamma A_\phi(\gamma, z) = -\frac{I_0}{2\gamma} W(\gamma, \Gamma) e^{\gamma z}. \quad (2.107)$$

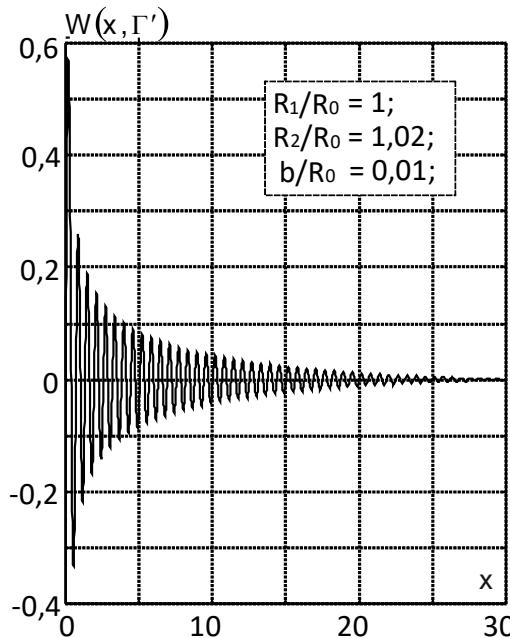


Рисунок 2.10 – Функция $W(x, \Gamma')$

Прямыми преобразованиями Ханкеля (2.104) и (2.105) соответствуют обратные интегральные преобразования

$$H_\rho(\rho, z) = \int_0^\infty \gamma H_\rho(\gamma, z) J_1(\gamma\rho) d\gamma, \quad H_z(\rho, z) = \int_0^\infty \gamma H_z(\gamma, z) J_0(\gamma\rho) d\gamma. \quad (2.108)$$

Подставляя в преобразования (2.108) соотношения (2.106) и (2.107), получаем

$$H_\rho(\rho, z) = \frac{I_0}{2} \int_0^\infty W(\gamma, \Gamma) e^{\gamma z} J_1(\gamma\rho) d\gamma, \quad H_z(\rho, z) = -\frac{I_0}{2} \int_0^\infty W(\gamma, \Gamma) e^{\gamma z} J_0(\gamma\rho) d\gamma.$$

Так как искомые функции $\Psi_\rho(\rho, z) = H_\rho(\rho, z)/I_0$ и $\Psi_z(\rho, z) = H_z(\rho, z)/I_0$, то формулы для их расчета записываются следующим образом

$$\Psi_\rho(\rho, z) = \frac{1}{2} \int_0^\infty W(\gamma, \Gamma) e^{\gamma z} J_1(\gamma\rho) d\gamma, \quad \Psi_z(\rho, z) = -\frac{1}{2} \int_0^\infty W(\gamma, \Gamma) e^{\gamma z} J_0(\gamma\rho) d\gamma. \quad (2.109)$$

Предваряя вычисления, которые предусмотрены формулами (2.109), рассмотрим поведение подынтегральных выражений в соотношениях (2.109) при изменении параметра интегрального преобразования в области $[0, \infty)$.

При $z < 0$ произведения $e^{\gamma z} J_1(\gamma\rho)$ и $e^{\gamma z} J_0(\gamma\rho)$ по модулю не превышают единицу, и являются монотонно убывающими функциями для всех значений координат $z \in (-\infty, 0]$ и $\rho \in [0, \infty)$. На рисунке 2.10 показано поведение функции $W(x, \Gamma')$ в зависимости от значений безразмерного параметра интегрального преобразования $x = \gamma R_0$. Множество геометрических параметров Γ' состоит из безразмерных элементов $r_1 = R_1/R_0$, $r_2 = R_2/R_0$ и $\beta = b/R_0$. Расчет выполнен для $r_1 = 1$; $r_2 = 1,02$ и $\beta = 0,01$. Отчетливо видно, что числовые значения функции $W(x, \Gamma')$ достаточно быстро убывают даже при таких значениях безразмерных геометрических параметров r_2 и β . При $r_2 \rightarrow 1$ и $\beta \rightarrow 0$ убывание числовых значений функции $W(x, \Gamma')$ с ростом значений безразмерного параметра x резко замедляется. Из показанных на рисунке 2.10 результатов следует, что при вычислении обратного преобразования Ханкеля формальную бесконечность в верхнем пределе интегралов в формулах (2.109) можно заменить конечным

числом x_{\max} . При этом выражения (2.109) принимают вид:

$$\begin{aligned}\Psi_{\rho}(\rho, z) &\equiv \frac{1}{2R_0} \int_0^{x_{\max}} W(x, \Gamma') e^{xz^*} J_1(x\rho^*) dx, \\ \Psi_z(\rho, z) &\equiv -\frac{1}{2R_0} \int_0^{x_{\max}} W(x, \Gamma') e^{xz^*} J_0(x\rho^*) dx,\end{aligned}\quad (2.110)$$

где $z^* = z/R_0$ и $\rho^* = \rho/R_0$ – безразмерные аксиальная и радиальная координаты.

На рисунке 2.11 показаны результаты вычислений нормированных значений функций $\hat{\Psi}_{\rho}(\rho, z) = 2R_0 \Psi_{\rho}(\rho, z)$ (рисунок 2.11а) и $\hat{\Psi}_z(\rho, z) = 2R_0 \Psi_z(\rho, z)$ (рисунок 2.11б) в ближайшей окрестности плоского печатного проводника с безразмерными геометрическими параметрами $r_1 = 1$; $r_2 = 1,02$ и $\beta = 0,01$. Вычисления проводились по формулам (2.110). Верхний предел интегрирования $x_{\max} = 300$. Весь интервал $[0, x_{\max}]$ изменения безразмерного параметра x разбивался на 400 полос. Числовое значение интеграла определялось как алгебраическая сумма средних значений подынтегрального выражения в каждой полосе. По осям ординат на рисунке 2.11а и рисунке 2.11б отложены числовые значения функций $\hat{\Psi}_{\rho}(\rho, z)$ и $\hat{\Psi}_z(\rho, z)$ соответственно, по осям абсцисс – значения безразмерной радиальной координаты $\rho^* = \rho/R_0$. Цифры возле кривых соответствуют безразмерной аксиальной координате $z^* = z/R_0$.

Особенности изменения функций $\hat{\Psi}_{\rho}(\rho, z)$ и $\hat{\Psi}_z(\rho, z)$ становятся очевидными, если их толкование осуществляется с использованием построений, которые показаны на рисунке 2.8.

Подставляя выражения (2.109) в определение (2.86) электродвижущей силы U^0 , получаем расчетную формулу:

$$U^0 = i\Phi_0 K(\Omega, \Pi), \quad (2.111)$$

где Φ_0 – электрический потенциал, который можно интерпретировать как

чувствительность плоского печатного проводника в режиме приема низкочастотных электромагнитных помех, которые создаются колеблющимся ферромагнитным диском; $K(\Omega, \Pi)$ – частотная характеристика приемника низкочастотных помех, т. е. печатного проводника; $\Omega = \omega\tau_0$ – безразмерная круговая частота; $\tau_0 = R_0/v_{cm}$ – постоянная времени; $v_{cm} = \sqrt{E/\rho_0}$ – стержневая скорость распространения упругих колебаний в материале ферромагнитного диска; Π – набор геометрических и физико-механических параметров физической системы, расчетная схема которой показана на рисунке 2.7.

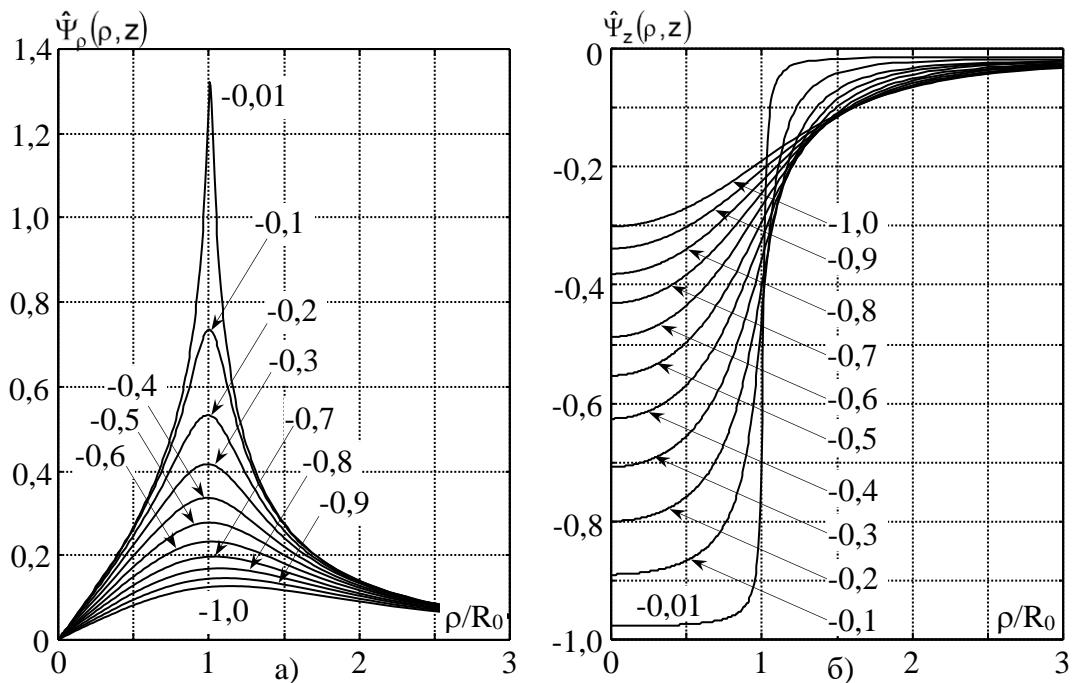


Рисунок 2.11 – Изменение функций $\hat{\Psi}_\rho(\rho, z)$ и $\hat{\Psi}_z(\rho, z)$ в ближайшей окрестности кольцевого печатного проводника

Чувствительность Φ_0 рассчитывается по формуле:

$$\Phi_0 = \pi U_0 H_z^0 \frac{\mu_0 h^2 m_2 v_{cm}}{\mu_{33}^\varepsilon R_0^2} \quad (2.112)$$

Если амплитуда смещений U_0 защемленного края ферромагнитного диска равна одному микрометру ($U_0 = 10^{-6}$ м), то при поле подмагничивания $H_z^0 = 1$ А/м, $\mu_{33}^\varepsilon = 32\mu_0$, $h/R_0 = 0,1$, магнитострикционной константе $m_2 = 0,32$ Гн/м и

$v_{cm} = 5000$ м/с числовое значение потенциала $\Phi_0 = 16 \cdot 10^{-9}$ В или 16 нановольт.

Частотная характеристика $K(\Omega, \Pi)$ приемника низкочастотных электромагнитных помех рассчитывается по формуле

$$K(\Omega, \Pi) = \Omega R_0 \int_0^{\infty} W(\gamma, \Gamma) \Xi(\gamma, \Omega, \Pi) d\gamma, \quad (2.113)$$

где $\Xi(\gamma, \Omega, \Pi) = (\mu_{11}^{\varepsilon}/\mu_0 - 1) \Xi_p(\gamma, \Omega, R_0) \Xi_p(\gamma, \Omega, L, h) + \Xi_z(\gamma, \Omega, R_0) \Xi_z(\gamma, \Omega, L, h);$

$$\Xi_p(\gamma, \Omega, R_0) = \frac{1}{R_0^2} \int_0^{R_0} \rho W_p(\rho) J_1(\gamma \rho) d\rho = \frac{(\lambda R_0)^2}{D_0(\lambda R_0)} \left\{ \frac{I_1(\lambda R_0)}{(\lambda R_0)^2 - (\gamma R_0)^2} [\lambda R_0 J_2(\lambda R_0) J_1(\gamma R_0) - \right. \\ \left. - \gamma R_0 J_1(\lambda R_0) J_2(\gamma R_0)] - \frac{J_1(\lambda R_0)}{(\lambda R_0)^2 + (\gamma R_0)^2} [\gamma R_0 J_2(\gamma R_0) J_1(\lambda R_0) + \lambda R_0 J_1(\gamma R_0) J_2(\lambda R_0)] \right\};$$

$$\Xi_p(\gamma, \Omega, L, h) = \frac{1}{h} \int_{-(L+2h)}^{-L} W_p(z') e^{\gamma z} dz = \frac{e^{-\gamma L}}{h} (1 + e^{-2\gamma h}) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p_k \lambda^3 \zeta_k^2 \alpha_k^2}{\zeta_k^2 (\lambda^4 - \zeta_k^4) (\gamma^2 + \alpha_k^2)};$$

$$\Xi_z(\gamma, \Omega, R_0) = \frac{1}{R_0^2} \int_0^{R_0} \rho W_z(\rho) J_0(\gamma \rho) d\rho = \frac{(\lambda R_0)^2}{D_0(\lambda R_0)} \left\{ \frac{I_1(\lambda R_0)}{(\lambda R_0)^2 - (\gamma R_0)^2} [\lambda R_0 J_1(\lambda R_0) J_0(\gamma R_0) - \right. \\ \left. - \gamma R_0 J_0(\lambda R_0) J_1(\gamma R_0)] - \frac{J_1(\lambda R_0)}{(\lambda R_0)^2 + (\gamma R_0)^2} [\gamma R_0 J_1(\gamma R_0) J_0(\lambda R_0) + \lambda R_0 J_0(\gamma R_0) J_1(\lambda R_0)] \right\};$$

$$\Xi_z(\gamma, \Omega, L, h) = \frac{1}{h} \int_{-(L+2h)}^{-L} W_z(z') e^{\gamma z} dz = \left(\frac{\mu_{33}^{\varepsilon}}{\mu_0} - 1 \right) \frac{e^{-\gamma L}}{h} (1 + e^{-2\gamma h}) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k p_k \gamma (\lambda \zeta_k)^2}{(\lambda^4 - \zeta_k^4) (\gamma^2 + \alpha_k^2)} - \\ - \frac{\mu_{33}^{\varepsilon}}{\mu_0} \frac{e^{-\gamma L}}{(\gamma h)^2} [\gamma h (1 + e^{-2\gamma h}) - (1 - e^{-2\gamma h})];$$

безразмерное волновое число $\lambda R_0 = \sqrt[4]{3R_0^2(1 - \nu^2)\Omega^2/h^2}$.

Для тонких дисков число α_k и, как следствие, волновые числа ξ_k и ζ_k , имеют числовые значения порядка 10^3 . В этой ситуации $\Xi_p(\gamma, \Omega, L, h)$ имеет порядок 10^{-12} , а компонент $\Xi_z(\gamma, \Omega, L, h)$ с хорошей степенью точности определяется формулой:

$$\Xi_z(\gamma, \Omega, L, h) = \Xi_z(\gamma, L, h) = -\frac{\mu_{33}^{\varepsilon}}{\mu_0} \frac{e^{-\gamma L}}{(\gamma h)^2} [\gamma h (1 + e^{-2\gamma h}) - (1 - e^{-2\gamma h})].$$

При этом $\Xi(\gamma, \Omega, \Pi) = \Xi_z(\gamma, \Omega, R_0) \Xi_z(\gamma, L, h)$, и частотная характеристика приемника низкочастотных электромагнитных помех рассчитывается по формуле

$$K(\Omega, \Pi) = \Omega \times \text{mod} \int_0^{x_{\max}} W(x, \Gamma') \Xi(x, \Omega, \Pi) dx, \quad (2.114)$$

где символ mod означает абсолютное значение (модуль) величины, которая записана после символа; x_{\max} – верхняя граница области существования заметных (более 0,001) значений подынтегрального выражения; $x = \gamma R_0$ – безразмерный параметр интегрального преобразования Ханкеля.

На рисунке 2.12 показаны частотные характеристики плоского кольцевого проводника с безразмерными геометрическими параметрами $r_1 = 1$; $r_2 = 1,02$; $\beta = 0,02$

Вычисления выполнены по формуле (2.114) при значении верхнего предела $x_{\max} = 50$. Весь интервал интегрирования был поделен на 400 полос. По осям абсцисс на рисунке 2.12 отложены значения безразмерной частоты Ω . Для ферромагнитного диска из никеля НП2Т (Ni 98%, Ti 2%) радиуса $R_0 = 0,1$ м ($E = 215$ ГПа; $\rho_0 = 8900$ кг/м³) значению $\Omega = 0,1$ соответствует циклическая частота $f = 782,3$ Гц. Безразмерное волновое число λR_0 рассчитывалось по формуле $\lambda R_0 = \sqrt[4]{3R_0^2(1 - v^2)} \Omega^2 / [h^2(1 + i/Q_0)]$, где Q_0 – добротность материала ферромагнитного диска. В данной серии расчетов $Q_0 = 500$. Безразмерные геометрические параметры, входящие в состав функции $\Xi(x, \Omega, \Pi)$, безразмерная толщина диска $h^* = h/R_0 = 0,01$. Безразмерное расстояние $L^* = L/R_0$ является вариативным параметром, числовые значения которого показаны в поле рисунков. Магнитная проницаемость ферромагнетика $\mu_{33}^e = 32\mu_0$.

Как следует из показанных на рисунке 2.12 результатов, электродвижущая сила U^0 , которая возникает в кольцевом печатном проводнике, принимает заметные значения на частотах механических резонансов колеблющегося ферромагнитного диска. На расстоянии $L = 0,5R_0$ на частотах третьего и четвертого резонансов электродвижущая сила низкочастотной помехи достигает почти что 100 нВ в постоянном поле подмагничивания $H_z^0 = 1$ А/м. Максимальные значения U^0 достаточно быстро убывают при увеличении

расстояния L . При этом максимальные значения электродвижущей силы, $K(\Omega, \Pi)$, которая генерируется на высокочастотных резонансах убывают быстрее.

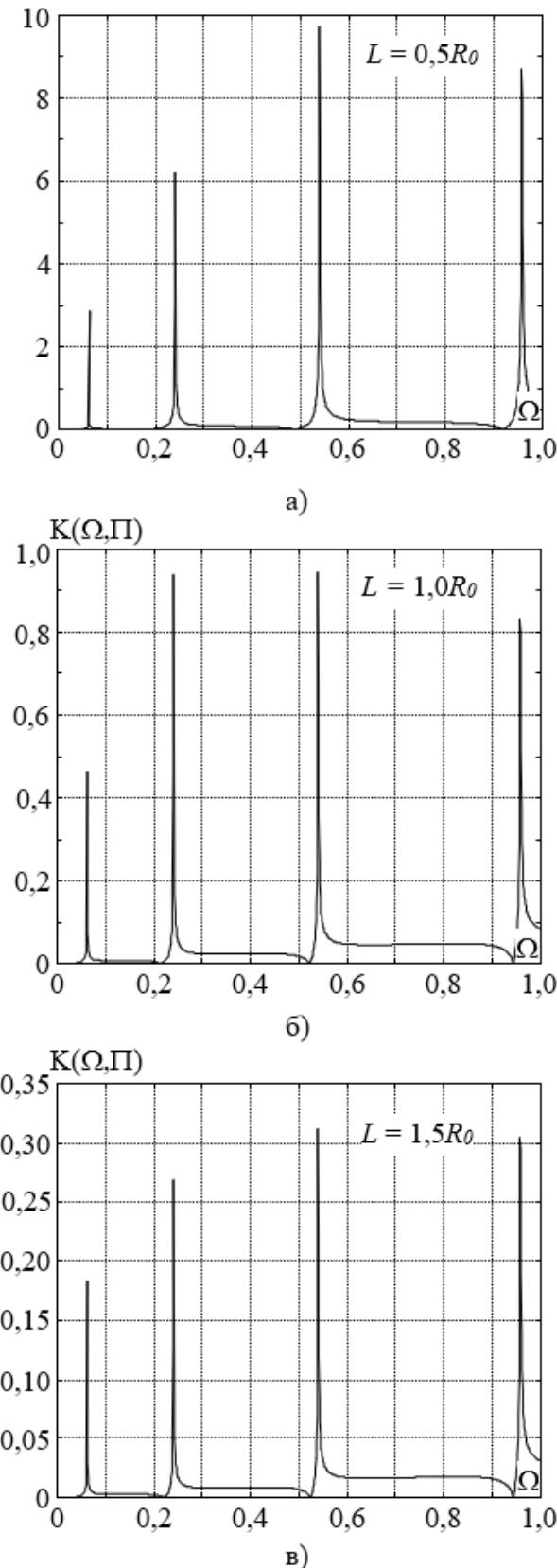


Рисунок 2.12 – Частотные характеристики печатного кольцевого проводника в режиме регистрации низкочастотных электромагнитных помех

2.6 Выводы

1. Показано, что источниками низкочастотных электромагнитных помех могут служить металлические элементы радиоэлектронной аппаратуры, которые совершают механические колебания при наличии постоянного или низкочастотного магнитного поля.

2. Получено решение краевой задачи электродинамики, отражающей процесс создания электромагнитного поля стержнем кругового поперечного сечения из металла неферромагнитной группы, который совершает гармонические упругие колебания при наличии постоянного магнитного поля.

3. Рассмотрен модельный пример формирования низкочастотного ЭМПоля, создаваемого стержнем круглого поперечного сечения, который совершает продольные гармонические колебания сжатия и растяжения при воздействии поперечного постоянного магнитного поля.

4. Установлено, что при механических колебаниях ферромагнитных экранов электромагнитного поля в присутствии постоянного магнитного поля в них из-за обратного магнитострикционного эффекта возникает изменяющаяся во времени намагниченность. Это означает, что вибрирующие ферромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры становятся источниками низкочастотного магнитного поля, т. е. источниками низкочастотных помех.

5. На примере ферромагнитного диска, совершающего осесимметричные колебания поперечного изгиба, рассмотрены последовательности вычислительных процедур, которые позволяют определить амплитуду переменной намагниченности колеблющегося диска и уровни переменного магнитного поля в окружающем его пространстве.

6. Дано оценка числовых значений напряженности эмитируемого за счет колебаний ферромагнитного диска низкочастотного магнитного поля и показано, что этот источник может создавать сигналы помех от десятков нановольт до единиц микровольт.

7. Выполнено численное моделирование характеристик низкочастотного магнитного поля, обусловленного вибрацией ферромагнитных компонентов радиоэлектронной аппаратуры.

8. С использованием теоремы о наведенном магнитном потоке обоснован метод определения уровня низкочастотного шума в печатном проводнике. На модельном примере плоского печатного проводника кольцевой формы сформирована количественная оценка электродвижущей силы и построена частотная характеристика печатного проводника в режиме регистрации низкочастотной электромагнитной помехи. Показано, что в среде с постоянным магнитным полем порядка 1 А/м низкочастотный шум электродвижущей силы составляет около 100 нВ на частоте механического резонанса колеблющегося ферромагнитного диска.

РАЗДЕЛ 3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА

ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ С УЧЕТОМ

ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ

РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ КИНОКОНЦЕРТНОГО

КОМПЛЕКСА

3.1 Анализ способов контроля электромагнитной обстановки

Среди способов оценки электромагнитной обстановки можно выделить экспериментальные и расчетно-теоретические.

Среди расчетно-теоретических методов существует несколько способов анализа электромагнитной обстановки, включая численные и аналитические методы.

1. Численные методы:

- метод конечных элементов (Finite Element Method, FEM);
- метод конечных разностей (Finite Difference Method, FDM);
- метод трассировки лучей (Ray Tracing Method);
- метод конечных объемов (Finite Volume Method, FVM);
- метод моментов (Method of Moments, MoM);
- метод конечных интегралов (Finite Integral Method, FIM);
- метод граничных элементов (Boundary Element Method, BEM);
- матричный метод линии передачи (The transmission-line matrix, TLM);
- метод интегральных уравнений (Integral Equation Method, IEM);
- метод эквивалентных зарядов (Method of Equivalent Charges, MEC);
- гибридный метод.

2. Аналитические методы:

- моделирование радиоволн на основе эмпирических формул (например, ITU-R P.1238);

- моделирование радиоволн на основе аналитических выражений (например, модель двухполосного распространения Motley-Keenan);
- моделирование радиоволн на основе статистических данных (например, модель COST 231 Multiwall);
- метод геометрической оптики;
- метод физической оптики;
- метод теории дифракции;
- метод теории рассеяния.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки и выбор метода зависит от конкретной задачи и доступных ресурсов.

Численные методы ориентированы на непосредственное решение уравнений поля, с учетом граничных условий, которые обусловлены геометрией и свойствами задачи. Несмотря на то, что численные методы требуют большего объема вычислений, чем аналитические методы или экспертные системы, они являются эффективным инструментом анализа ЭМО.

При решении задач обеспечения ЭМС необходим анализ ЭМПоля в непосредственной близости от ТС с учетом условий их физического размещения. Это создает известные сложности при проведении экспериментов (*in situ*) и достоверного отображения результатов, полученных эмпирическим путем. Очевидно, что именно это обстоятельство обусловило возросший, особенно в последние десятилетия, интерес к разработке методик по прогнозированию ЭМО.

Анализ известных способов контроля ЭМО позволяет выделить различные группы, отличающиеся методикой измерения и исследуемыми параметрами ЭМПоля. В [71] приведена классификация существующих способов экспериментального контроля ЭМО.

В настоящее время не существует единого стандарта или нормативного акта, который бы четко определял методику контроля ЭМПоля в культурно-зрелищных объектах, что приводит к несогласованности в применении различных методик и стандартов на практике. В соответствии с нормативными

документами [72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85] контроль ЭМПоля реализуется в различных условиях воздействия: электростатического поля, постоянного магнитного поля, электрического и магнитного полей промышленной частоты 50 Гц, электромагнитных полей в диапазоне частот 10 кГц – 30 кГц, электромагнитных полей в диапазоне частот 30 кГц – 300 ГГц. При этом, учитывая различные допустимые уровни воздействия ЭМИ, последний из рассмотренных: радиочастотный диапазон – дополнительно классифицируется на поддиапазоны: 30 кГц – 3 МГц; 3 МГц – 30 МГц; 30 МГц – 50 МГц; 50 МГц – 300 МГц; 300 МГц – 300 ГГц [86].

3.2 Математическая модель электромагнитной обстановки помещения аппаратной киноконцертного комплекса и численный алгоритм её реализации

Сложность структуры ЭМПоля в помещении аппаратной, а также множество влияющих факторов, формируют трудности для комплексного решения проблемы электромагнитного прогнозирования. На сегодняшний день не существует единой методики комплексного анализа ЭМО в функционально насыщенных помещениях (промышленных, офисных, бытовых помещениях и пр.). Тем не менее, предприняты отдельные попытки разработки теоретических моделей для некоторых ТС, находящихся в таких помещениях [87, 88, 89]. Таким образом, одной из ключевых научно-технических задач остается разработка методик для точного прогнозирования электромагнитной обстановки в функционально насыщенных помещениях. Это включает в себя создание автоматизированных систем, которые будут основаны на данных методиках и обеспечат эффективное управление и мониторинг электромагнитной обстановки в реальном времени.

Важнейшей начальной стадией обеспечения ЭМС является оценка электромагнитной обстановки, в условиях которой будет функционировать система. При этом следует располагать данными об общей электромагнитной

обстановке в помещении, где расположено оборудование, т.к. было ранее показано соответствие отдельных устройств стандартам ЭМС не свидетельствует об электромагнитной совместимости системы в целом.

Для выяснения электромагнитной обстановки киноконцертного комплекса необходимо обоснованно подходить к выбору соответствующего метода – можно использовать методы, основанные на прямых измерениях, методы имитационного моделирования и расчетные методы. Преимущества расчетных методов и методов имитационного моделирования заключаются в том, что прогнозирование электромагнитной обстановки можно осуществлять на стадии проектирования нового объекта. Метод прямых измерений используют для определения ЭМО на действующих объектах, подлежащих реконструкции и в связи с модернизацией комплекса ТС.

На примере аппаратной современного киноконцертного комплекса, где сосредоточена разнообразная функциональная аппаратура (мультимедийная, информационная, электросиловая и пр.), которая работает в широком диапазоне частот и обладает высокой чувствительностью - синтезируем метод моделирования электромагнитной обстановки (ЭМО).

Для рационального решения задачи обеспечения ЭМС киноконцертного комплекса необходимо проводить исследования и контроль ЭМО на объектах зрелищных мероприятий перед размещением в них современной информационной, звукотехнической, силовой и другой аппаратуры с целью прогнозирования условий обеспечения ЭМС.

При современном подходе к проектированию технически оснащенных зданий и сооружений особое значение приобретает возможность использования программных средств анализа, которые позволяют выполнить анализ ЭМО на ранних стадиях проектирования.

На основе сравнительного анализа, выполненного в разделе 1, показано, что, несмотря на наличие ограничений, установленных регламентирующими документами на уровне эмиссии, проблема обеспечения ЭМС аппаратуры

киноконцертного комплекса и источников непреднамеренных электромагнитных помех не теряет актуальности.

В современных условиях необходимо постоянно совершенствовать методы прогнозирования уровней электромагнитных помех для обоснованного применения противопомеховых средств: сетевых и информационных фильтров, экранирующих конструкций и тому подобное. Данные по моделированию ЭМО в помещениях приведены, в частности в работах [90, 91, 92].

Суть дальнейшего исследования заключается в разработке метода определения состояния электромагнитной обстановки на основании пространственной картины электромагнитной эмиссии и – прикладной программы для реализации всеобъемлющего контроля электромагнитной эмиссии от различных источников в разных диапазонах рабочих частот оборудования различного назначения, и, как результат – компьютерное моделирования электромагнитных полей.

Современный киноконцертный комплекс – это сложное многофункциональное архитектурное строение с большим количеством помещений, однако аппаратная киноконцертного комплекса представляет наибольший интерес в аспекте ЭМС, т.к. здесь сосредоточена основная часть технологического оборудования. Оборудование киноконцертного комплекса содержит функциональные узлы и элементы различных типов: электромеханические, электронные, энергетические. В номинальных и переходных режимах работы они выступают источниками электромагнитных помех в широкой полосе частот — от десятков килогерц до сотен мегагерц, с уровнями от десятков до, в некоторых случаях, 140 дБ. [4, с. 6]. Помещение аппаратной в составе киноконцертного комплекса является локализованным пространством, содержащим функционально насыщенные устройства, которые можно рассматривать как источники и рецепторы электромагнитных помех. Комплекс устройств в аппаратной, как источников и рецепторов непреднамеренных помех приведен в таблице 3.1. На рисунке 3.1 (вид сверху)

представлен общий план размещения технологического оборудования в аппаратной киноконцертного зала.

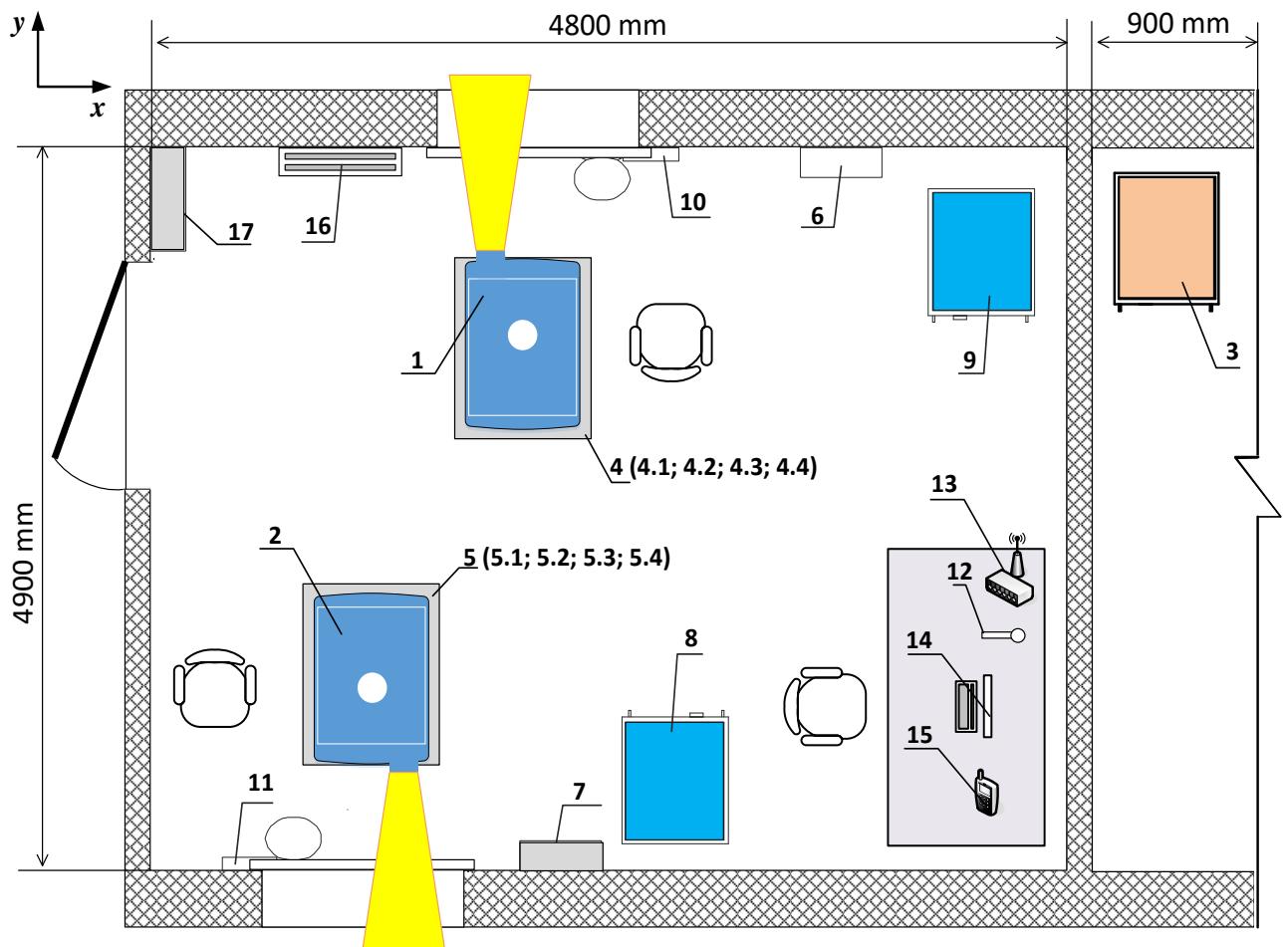


Рисунок 3.1 – Общий план аппаратной киноконцертного зала (вид сверху)

Аппаратная, представленная на рисунке 3.1, обеспечивает демонстрацию фильмов одновременно в двух зрительных залах. Современные кинотеатры классифицируются на миниплексы, в которых количество зрительных залов варьируется от 2 до 5, а также мультиплексы, где их число превышает 5, а в отдельных случаях достигает 20 и более. Это приводит к увеличению количества оборудования и, как следствие, к ухудшению электромагнитной обстановки в аппаратной.

Экспликация основного и вспомогательного оборудования, которое представлено на рисунке 3.1 и отображено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Экспликация оборудования

№	Кол-во	Наименование оборудования
1, 2	2	DLP проектор
3	1	Офисный сервер (расположенный в соседнем помещении)
4, 5 4.1, 5.1 4.2, 5.2 4.3, 5.3 4.4, 5.4	2	Пьедестал содержит: Видеосервер; Источник бесперебойного питания (ИБП); DVB-T2 приемник; Модуль синхронизации 3D-системы.
6, 7	2	Темнитель света
8, 9	2 2 10	19" звуковая стойка, которая содержит: Звуковой процессор; Усилители звуковой мощности.
10, 11	2	Механизм предэкранного сценического занавеса
12	1	Беспроводной микрофон
13	1	Wi-Fi роутер
14	1	Монитор, клавиатура, мышка
15	1	Мобильный телефон
16	1	Кондиционер
17	1	Распределительное устройство коммутационное (РУК)

Следует отметить, что источники непреднамеренных помех с достаточно высоким уровнем излучения в определенном диапазоне частот могут совпадать на рабочей частоте с другим оборудованием. В таких случаях оборудование становится рецептором с высокой чувствительностью (к сигналам) или восприимчивостью (к помехам). Значения чувствительности оборудования, приведенные в таблице 3.2, взяты из технических паспортов рассматриваемого оборудования.

Обеспечить ЭМС всего комплекса с большим количеством устройств с разными диапазонами рабочих частот, которые могут быть как источниками, так и рецепторами ЭМП, возможно только после адекватного моделирования электромагнитной обстановки.

Таблица 3.2 – Чувствительность оборудования

Оборудование	Диапазон частот, MHz	Чувствительность, dBm
Беспроводной микрофон	520 … 820	–110
Bluetooth устройство	2400 … 2483.5	–90
E-GSM-900 сотовый телефон	925.0 … 960.0	–102
WCDMA модем	2100 … 2125	–123
Wi-Fi, 802.11 b/g/n	2412 … 2484	–91
Wi-Fi, 802.11 a/h/j/n/ac	5170 … 5620	–94
DVB-T приемник	174 … 826	–80
FM приемник	88 … 108	–108

Для моделирования распределения поля помех от непреднамеренных источников в месте расположения рецептора необходимо решить систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_{r1} &= L_{11}P_{e1} + \dots + L_{1N}P_{eN} \\ P_{r2} &= L_{21}P_{e1} + \dots + L_{2N}P_{eN} \\ &\dots \\ P_{rN} &= L_{N1}P_{e1} + \dots + L_{NN}P_{eN} \end{aligned} \right\},$$

где P_{ei} – мощность, излучаемая излучателем в i -й ячейке;

P_{rj} – мощность на рецепторном входе в j -й ячейке;

L_{ji} – коэффициент потерь при распространении электромагнитной волны от излучателя в i -й ячейке к рецептору, находящемуся в j -й ячейке.

Несмотря на множество различных моделей распространения радиоволн внутри зданий, выбрана модель ITU-R P.1238-8 [93], охватывающая диапазон частот от 300 МГц до 100 ГГц, как наиболее подходящая для нашего случая. Естественно, разработанная программа может быть применена и к другим моделям, например, описанным в обзорах [94, 95, 96].

Базовая модель ITU-R P.1238-8 имеет следующий вид:

$$L_{total} = L(d_o) + N \log_{10} \frac{d}{d_o} + L_f(n),$$

где N – коэффициент потерь мощности (таблица 3.3);

f – частота, MHz;

d – расстояние в метрах между эммитером и рецептором (где $d > 1$ м);

d_o – эталонное расстояние, 1 м;

$L(d_o)$ – потери на трассе в d_o (dB), для эталонного расстояния до на 1 м и принимая распространение в свободном пространстве $L(d_o) = 20 \log_{10} f - 28$, где f выражается в MHz;

L_f – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через пол, dB;

n – количество этажей между источником и рецептором ($n \geq 0$), $L_f = 0$ dB при $n = 0$.

Типичные значения коэффициента потерь мощности – N для расчета потерь при передаче сигнала внутри помещений для различных объектов фрагментарно представлены в таблице 3.3 из [93, с.4].

Таблица 3.3 – Коэффициент потерь для различных объектов

Частота	Жилое помещение	Служебное помещение	Помещение торгового назначения	Завод	Коридор
900 MHz	–	33	20	–	–
1.9 GHz	28	30	22	–	–
2.1 GHz	–	25.5	20	21.1	17
2.4 GHz	28	30	–	–	–
2.625 GHz	–	44	–	33	–

Блок-схема алгоритма программы моделирования электромагнитной обстановки в киноконцертном комплексе представлена на рисунке 3.2. Алгоритм построен по принципу дискретно-итерационного деления. Предлагаемая методика основана на разбиении исследуемой области на двумерную сетку, состоящую из множества ячеек, что позволяет производить расчет в каждой отдельной ячейке. Размер ячейки составляет $0,1 \times 0,1$ м.

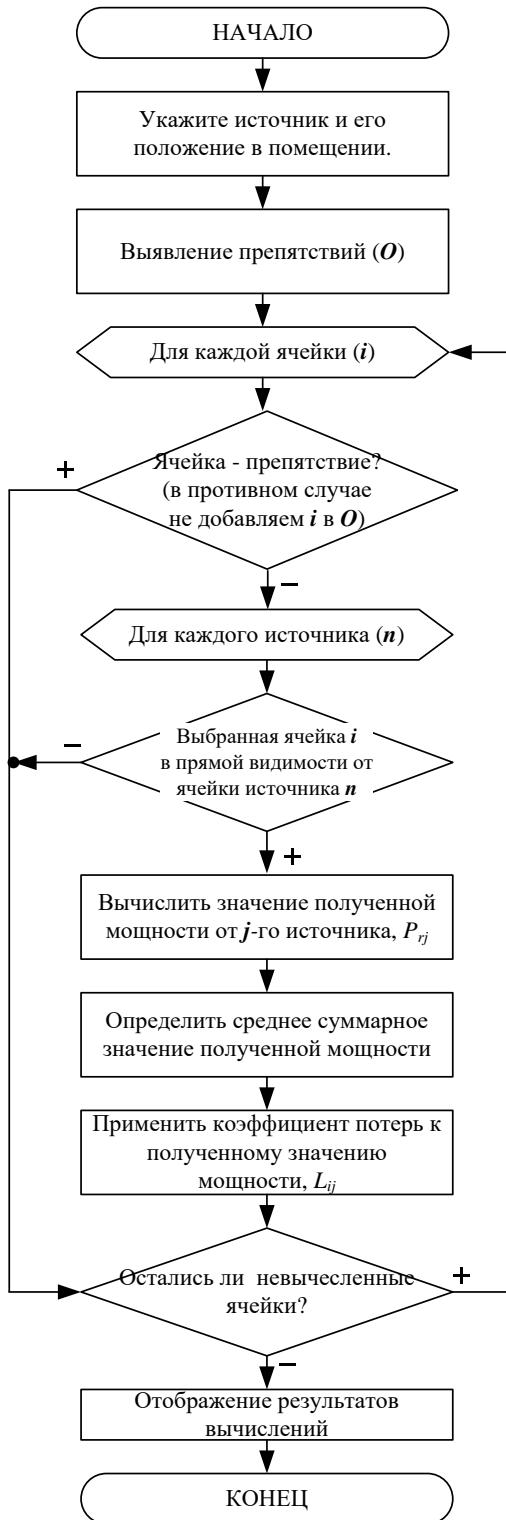


Рисунок 3.2 – Алгоритм моделирования электромагнитной обстановки в киноконцертном комплексе

Пользователь изначально определяет ячейки, в которых размещается оборудование, которое может быть как источником, так и рецептором помех.

Программа моделирует воздействие n -го количества источников электромагнитных помех в дальней зоне на каждую ячейку, за исключением ячейки, содержащей сам источник помех. Максимально возможное количество источников электромагнитных помех – 500.

Исходными данными, необходимыми для начала оценки ЭМО, являются: расположение оборудования, рассматриваемого как источники непреднамеренных помех и препятствий, внутри аппаратной (координаты: $x(n)$ и $y(n)$); частотный диапазон (f , МГц); относительные максимально допустимые уровни излучения для соответствующего оборудования (E , дБ), взяты для представленных расчетов из [21, 23, 25]. В программе предусмотрена возможность пересчета из дБ в дБм (для нагрузки 50/75 Ом). Скриншот фрагмента программы с исходными данными представлен на рисунке 3.3.

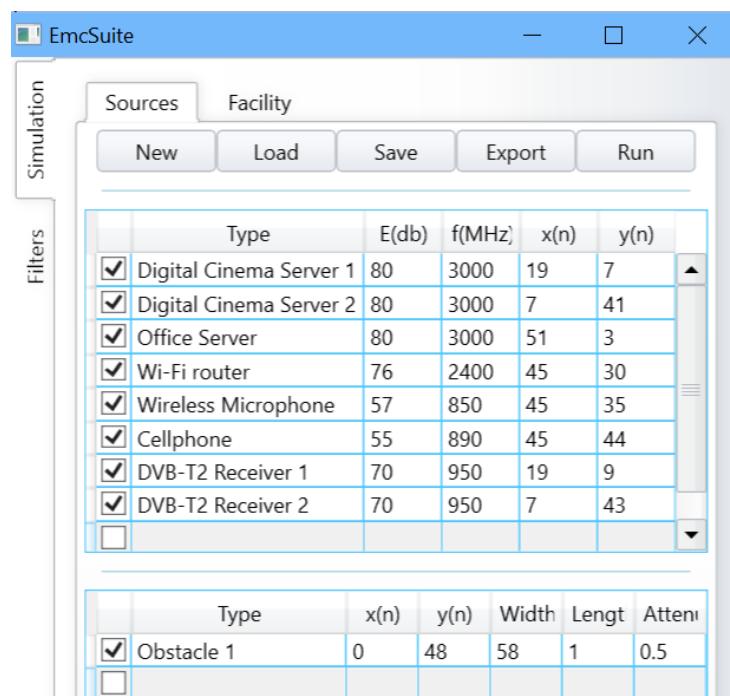


Рисунок 3.3 – Пример рабочего окна разработанной программы для ввода исходных данных

На основе исходных данных программа моделирует карту электромагнитной обстановки в помещении и реализует расчет уровня суммарной мощности всех источников излучения в аппаратной по принципу

суперпозиции для одной и той же частоты (рисунок 3.4), а также предоставляет информацию о влиянии каждого источника в отдельности (рисунок 3.5).

Согласно разработанному алгоритму, осуществляется расчет взаимодействия между ячейкой-источником энергии и ячейками-рецепторами с учетом препятствий между ними. Алгоритм предусматривает расчет суммарного воздействия мощности от источников на каждую ячейку-рецептор.

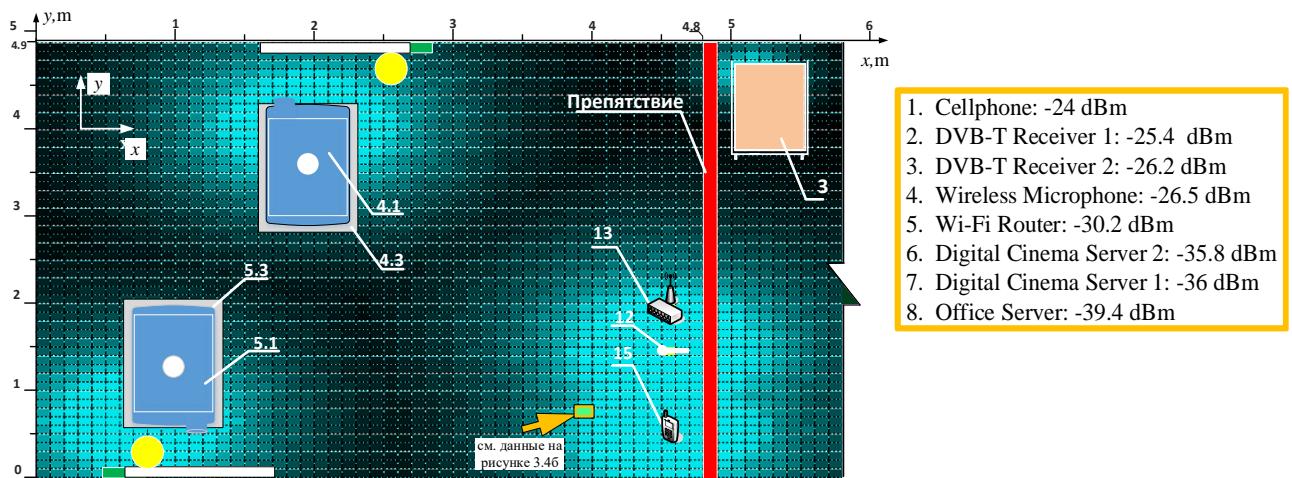
На рисунке 3.4а представлены результаты моделирования ЭМИ в аппаратной площадью $27,9 \text{ м}^2$, показанной на рисунке 3.1 (нумерация рисунка 3.4 соответствует таблице 3.1). Аппаратная представлена 2842 индивидуальными ячейками. Для получения дополнительной информации о влиянии каждого источника отдельно в любой элементарной ячейке в графическом интерфейсе пользователя (GUI) программы достаточно просто переместить курсор в интересующую ячейку и получить интересующие данные (рисунок 3.4б).

На рисунках 3.5а–г представлены результаты моделирования ЭМО в помещении аппаратной (рисунок 3.1) для непреднамеренных источников ЭМП, представленных в таблице 3.1.

На этих рисунках видно, что основное влияние при распределении результирующего электромагнитного поля вносят сотовый телефон и приемники DVB-T. Мощность этих источников электромагнитного поля не менее 10 дБм по сравнению с другими источниками помех.

Представленные на рисунках 3.5а–г модели распределения электромагнитного поля позволяют оценить ЭМО внутри здания перед установкой оборудования.

Разработанная прикладная программа написана в среде Microsoft Visual Studio [97] на языке С # [98] и предназначена для определения общего среднего уровня мощности, генерируемого в аппаратной, и оценки уровня мощности, излучаемой от каждого источника в каждой ячейке исследуемой области пространства.

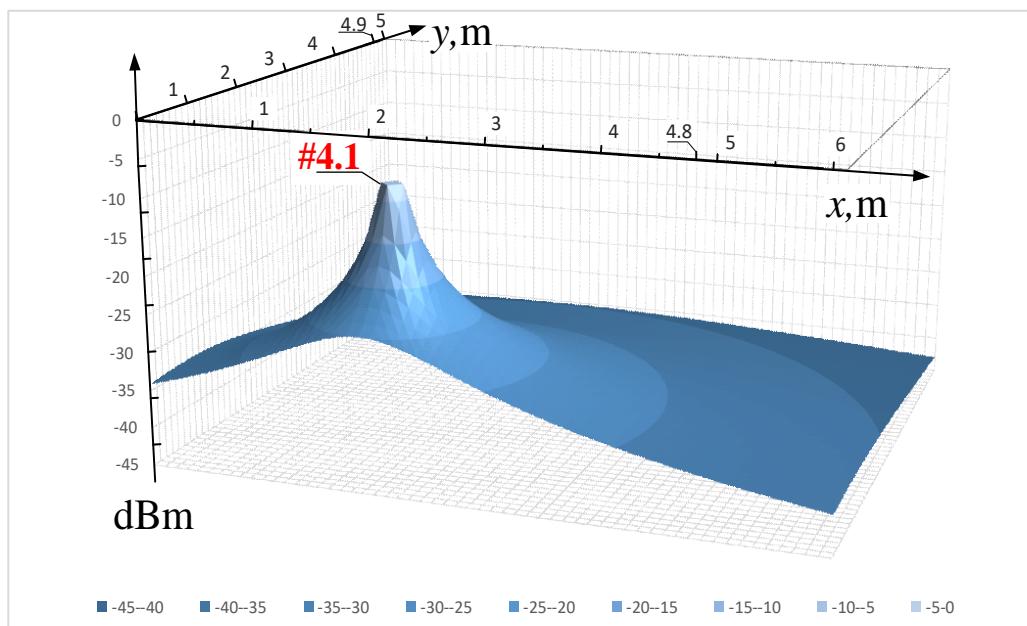


a)

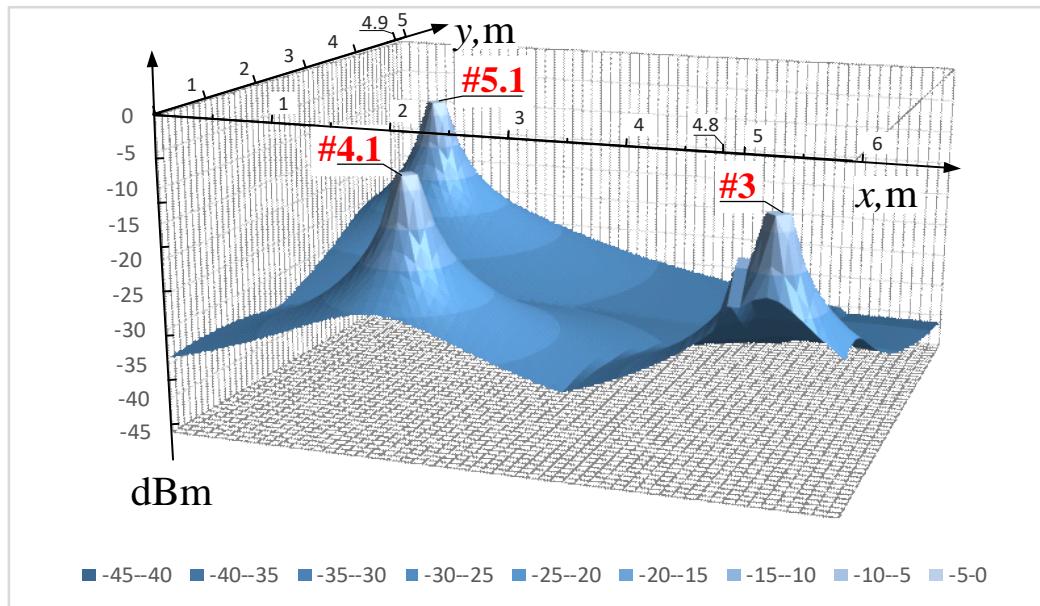
б)

Рисунок 3.4 – Результаты моделирования ЭМО в аппаратной

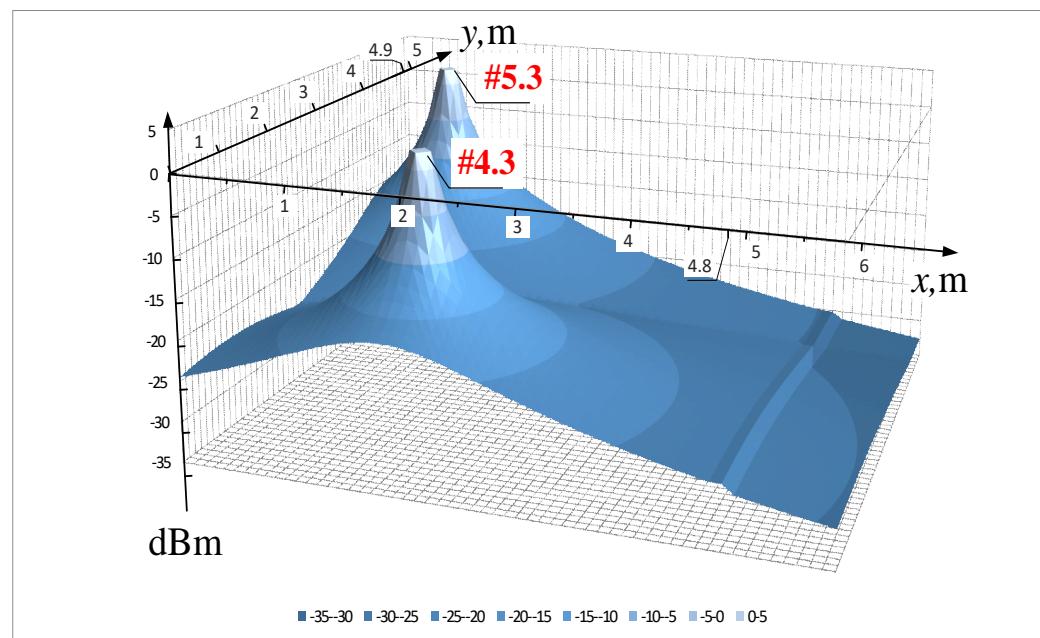
- (а) Проекция рассчитанных уровней электромагнитных помех на план аппаратной. Обратите внимание на выбранную элементарную ячейку;
- (б) список источников, указанных во входных данных (рисунок 3.3), где в порядке убывания показан результат рассчитанного индивидуального воздействия для выбранной элементарной ячейки



a) Воздействие источника № 4.1: видеосервера



б) Воздействие источников № 3, 4.1, 5.1: офисного сервера и двух видеосерверов



в) Воздействие источников № 4.3, 5.3: DVB-T2 приемников

Рисунок 3.5 – Результаты моделирования ЭМО в аппаратной (источники пронумерованы согласно таблице 3.1)

Полученные результаты дают проектировщику оценочную картину воздействия источников помех в интересующей области пространства с учетом

существующих или специально установленных препятствий распространения электромагнитной энергии, и позволяют на основании полученной картины предпринять необходимые меры по обеспечению электромагнитной совместимости, например: физического планирования или применения специальных экранов для уменьшения воздействия на чувствительное оборудование.

3.3 Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных

В работе [4, с.8] выполнены измерения ЭМО в киноаппаратных, которые имеют более старую конфигурацию оборудования, где использовалось пленочное кинотехнологическое оборудование. Результаты проведенных измерений в аппаратной свидетельствуют о сложной электромагнитной обстановке, формируемой различным оборудованием в составе киноконцертного комплекса.

Измерения, которые выполнены в испытательной лаборатории отличаются от измерений, полученных на месте эксплуатации (*in situ*) систем и установок, что усугубляет решаемую задачу. Существует необходимость разработки общих рекомендаций, методов и приемов измерения и оценки ЭМО непосредственно на рабочем месте.

При оценке ЭМО использовался измерительный прибор напряженности ближнего и дальнего поля: NFM 1 [99] и МЕН-25 [100].

В таблице 3.4 представлена сводная таблица с результатами сравнения экспериментальных измерений ЭМО (*in situ*) и результатов моделирования в разработанной прикладной программе для помещений аппаратных.

Таблица 3.4 – Сравнение результатов моделирования с экспериментальными результатами

Наименование оборудования	Координаты оборудования		Результаты моделирования (дБм)	Экспериментальные результаты (дБм)	Расхождение результатов не более, %
	x(n)	y(n)			
Видеосервер №1	19	7	-20.7	-18	15
Видеосервер №2	7	41	-20,7	-18,5	11,8
Офисный сервер	51	3	-20.7	-18.3	13
Wi-Fi роутер	45	30	20	18	10
Беспроводной микрофон	45	35	10	11	11
Смартфон	45	44	22.43	22	2
DVB-T2 приемник №1	19	9	-3.27	-3.7	13
DVB-T2 приемник №2	7	43	-3.27	-3	9

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных исследования ЭМП на частоте 890 МГц в контрольных точках горизонтальной линии контроля показаны на рисунке 3.6.

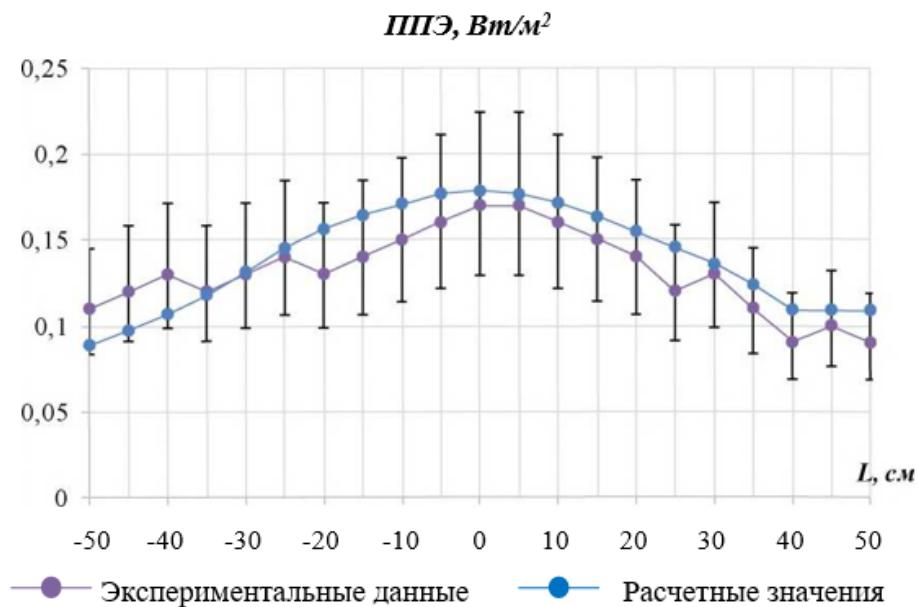


Рисунок 3.6 – Результаты исследования ЭМП на частоте 890 МГц в контрольных точках горизонтальной линии контроля

Результаты моделирования показывают, что максимальный уровень электромагнитной помехи может достигать 22.43 дБм. Это значение по эксперименту составляет примерно 22 дБм.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных позволяет сделать вывод, о достаточно высокой степени согласования результатов, расхождение составляет от 2 до 15%.

3.4 Выводы

1. Показано, что комплекс киноконцертного зала оборудован разнотипной аппаратурой (информационной, силовой, мультимедийной и пр.) с вариацией уровней излучаемых помех до десятков дБм, восприимчивостью порядка -10 – -70 дБм в широком диапазоне частот (от сотен МГц до единиц ГГц), что создает сложную электромагнитную обстановку и соответственно проблемы с обеспечением электромагнитной совместимости.

2. Для конкретного набора устройств, которые выступают как рецепторами, так и источниками непреднамеренных помех в кинотеатрах и концертных залах, определены уровни помех внутри помещения аппаратной.

3. Разработана прикладная программа для оценки уровней электромагнитного поля с возможностью визуализации прогнозируемой электромагнитной обстановки и формулирования рекомендаций по обеспечению её соответствия выдвигаемым требованиям. Полученные результаты предоставляют разработчикам предварительные данные для принятия обоснованных решений о необходимости применения дополнительных средств и мероприятий с целью обеспечения электромагнитной совместимости объектов: физическое разделение, защитные экраны, фильтры электромагнитных помех и т. д.

4. Проведенное сравнение результатов моделирования, полученных с помощью предложенной прикладной программы, с результатами измерений в конкретных помещениях показывают работоспособность программы и возможность ее практического применения.

РАЗДЕЛ 4

КОМПЛЕКСНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕГЛАМЕНТИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В КИНОКОНЦЕРТНОМ ЗАЛЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1 Комплексный подход к решению задачи обеспечения электромагнитной совместимости

Для комплексного решения проблемы обеспечения ЭМС на современных объектах культуры, в т.ч. кинотеатрах, киноконцертных комплексах, необходимо реализовать целый комплекс мероприятий, предполагающих следующие этапы.

1. Анализ электромагнитной обстановки объекта. Анализ ЭМО рекомендуется производить до начала проектно-монтажных работ на объекте для выявления потенциальных проблем и оптимизации проектных решений. Предварительное выявление и устранение проблем позволяет избежать дополнительных затрат и издержек в дальнейшем.

Использование современных методов прогнозирования ЭМО позволяют получить уже на стадии проектирования необходимую информацию об уровнях ЭМИ. Однако, следует отметить, что даже при детальном рассмотрении вопросов обеспечения ЭМС на начальном этапе с помощью расчетных методов, всегда существует необходимость в дополнительной экспериментальной проверке. Это обусловлено тем, что на этапе проектирования невозможно выявить и учесть все факторы, которые могут повлиять на функционирование объекта. К числу таких факторов относятся неизбежные дефекты, возникающие в процессе выполнения монтажных работ, недокументированные изменения в конструкции, которые могут происходить в процессе эксплуатации. Кроме того, коррозия заземляющих элементов и другие внешние воздействия могут существенно повлиять на ЭМО исследуемого объекта.

Проведенный анализ позволяет конкретизировать отрицательные факторы, влияющие на ЭМО объекта. Перечень отрицательных факторов представлен в таблице 4.1, согласно [101, 102].

Таблица 4.1 – Отрицательные факторы, влияющие на ЭМО объекта

№	Отрицательные факторы
1.	Отсутствие или повреждение электрического контакта между заземляемым электронным оборудованием и заземлителем.
2.	Плохое качество соединений между элементами системы заземления
3.	Несоответствие конфигурации системы заземления современным стандартам и нормам
4.	Увеличенное значение сопротивления заземления (сопротивления растеканию электрического тока) определяется как величина "противодействия" растеканию электрического тока в земле, поступающего в неё через заземлитель.
5.	Недостаточно эффективное высокочастотное заземление. Эффективное высокочастотное заземление требует использования специальных материалов и конструкций, которые обеспечивают низкое сопротивление и индуктивность на высоких частотах.
6.	Вероятность появления опасного потенциала в кабельных каналах и системе заземления электронной аппаратуры от высоковольтных устройств и молниезащиты.
7.	Распределение тока молнии вблизи технологического оборудования и коммутационных линий.
8.	Недостаточная площадь сечения токоведущих линий, предназначенных для питания аппаратуры, с учетом предполагаемой нагрузки.
9.	Токи утечки.
10.	Плохое соединение защитного заземляющего проводника (РЕ) и нейтрального проводника (N) на уровне трансформатора или распределительного устройства.
11.	Неудовлетворительные параметры электроэнергии.
13.	Импульсные помехи вследствии коммутации электросилового оборудования, а также от электромеханических устройств.
14.	Высокие уровни электромагнитных полей, в т.ч. способствующие формированию искажений в звуковом тракте, а также визуальных артефактов (например, т.н. эффект «дрожания» в мониторах).
15.	Неравномерное распределение нагрузки.
16.	Недостаточные показатели электрической прочности и сопротивления изоляционного материала.
17.	Наличие высоких потенциалов на элементах системы заземления при коротких замыканиях в высоковольтной сети с заземленной нейтралью.
18.	Формирование магнитных полей в зоне расположения ТС при коротком замыкании в высоковольтной сети с заземленной нейтралью.

На основе результатов анализа оценивается готовность объекта к

внедрению современного оборудования и разрабатываются корректирующие мероприятия или рекомендации по улучшению ЭМО.

2. Разработка корректирующих мероприятий. Разработка корректирующих мероприятий или рекомендаций после проведенного анализа ЭМО на объекте позволяет уже на стадии проектирования принимать обоснованные решения для обеспечения ЭМС на объекте. Для комплексного решения вопросов обеспечения ЭМС в киноконцертном комплексе следует опираться на современную концепцию зон защиты, актуальные версии стандартов по обеспечению ЭМС, правила устройства электроустановок (ПУЭ), а также санитарные нормы и правила [103, 104, 105, 106, 107, 108, 109].

В качестве эффективных технических решений можно выделить: модернизацию системы заземления, молниезащиты, электроснабжения, экранирование, защиту от статического электричества; внедрение устройств защиты от импульсных помех, помехоподавляющих фильтров, разделительных трансформаторов, устройств защитного отключения, а также изменение расположения аппаратуры и маршрутов прокладки информационных и электросиловых кабелей.

3. Монтажные работы. Конфигурация построения систем электроснабжения и заземления должна соответствовать современным требованиям. При реализации монтажных работ необходимо: согласовать прокладку чувствительных информационных цепей с системами электропитания и заземления; разделение подсистем для электроснабжения чувствительного информационного и мультимедийного оборудования, а также силовой аппаратуры; реализацию отдельного защитного заземления для информационной техники; внедрение зонной концепции защиты и пр.

В соответствии с современными требованиями организация систем электроснабжения и заземления позволяет повысить надежность работы как отдельных технических средств, так и системы в целом, а также исключить значительную часть отказов и сбоев. Исключение токов утечки улучшает качество изображения на устройствах отображения информации и обеспечивает

соответствие уровней магнитных полей санитарным нормам.

Правильная топология систем электроснабжения и заземления позволяет максимально эффективно использовать дополнительные защитные технические средства для борьбы с атмосферными и коммутационными перенапряжениями. Для подавления таких перенапряжений используют защитные устройства на основе нелинейных элементов. Эти устройства размещаются в соответствии с зонной концепцией согласно: обновлённой серии стандартов IEC 61000, а также ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 [110]. Зонная концепция предусматривает разделение объекта на защитные зоны. Зоны защиты классифицируются от I до III в порядке убывания уровня помех, а зона 0 охватывает открытую территорию за пределами здания. Железобетонные стены как правило выступают границами зон, выполняя роль электромагнитных экранов. Кондуктивные соединения между зонами оснащаются защитными устройствами соответствующего класса.

4. Проведение испытаний. После выполнения монтажных и пусконаладочных работ в отдельных случаях необходимо проводить испытания на помехоэмиссию и помехоустойчивость электронной аппаратуры, средств подавления помех, а также отдельных компонентов системы электроснабжения.

5. Инструктаж и защита персонала. Защита персонала от воздействия ЭМП является важным аспектом в обеспечении производственной безопасности. Перед началом эксплуатации нового или реконструируемого объекта необходимо предусмотреть проведение инструктажей персонала по трем ключевым направлениям: ЭМС, электроснабжение и заземление электронной аппаратуры. На основе анализа ЭМО исследуемого объекта необходимо разработать защитные мероприятия, которые предполагают: экранирование как источников, так и рецепторов помех; физическое разнесение расположения оборудования и рабочих мест персонала, симметрирование кабелей, изменение топологии прокладки трасс кабелей, с целью снижения уровней ЭМП до безопасных значений.

4.2 Вычислительный алгоритм оценки эффективности защиты от электромагнитных полей в зависимости от параметров экранирующих материалов

Экранирование оборудования от электромагнитных помех (ЭМП) – это одно из действенных средств обеспечения надежной работы аудиовизуальных систем в киноконцертных комплексах. Электромагнитные помехи могут существенно влиять на качество передачи сигнала, вызывая сбои в работе чувствительного оборудования, что критически важно для мультимедийных и информационных систем [111].

Для решения задачи экранирования применяются материалы с различными свойствами, что вызывает необходимость оценки их эффективности. Результаты исследований рабочей группы SC-05-05, сформированной Обществом инженеров-акустиков (AES) по разработке стандартов ЭМС для профессионального звукового оборудования [112], а также материалы публикаций [113, 114, 115, 116, 117], в которых рассматриваются методы анализа и применения экранирующих материалов, представляют базу для дальнейших исследований проблемы.

Структурная схема алгоритма, иллюстрирующая процесс анализа эффективности экранирования с применением различных материалов, приведена на рисунке 4.1. Алгоритм использует выражение (4.1) для расчета A – потерь на поглощение (Absorption Loss), выражение (4.2) для расчета R – потерь на отражение (Reflection Loss), выражение (4.3) для расчета B – потерь на многократные отражения (Multiple Reflection Loss). Общая эффективность экранирования SE (Shielding Effectiveness) определяется как сумма трёх компонентов, согласно (4.4).

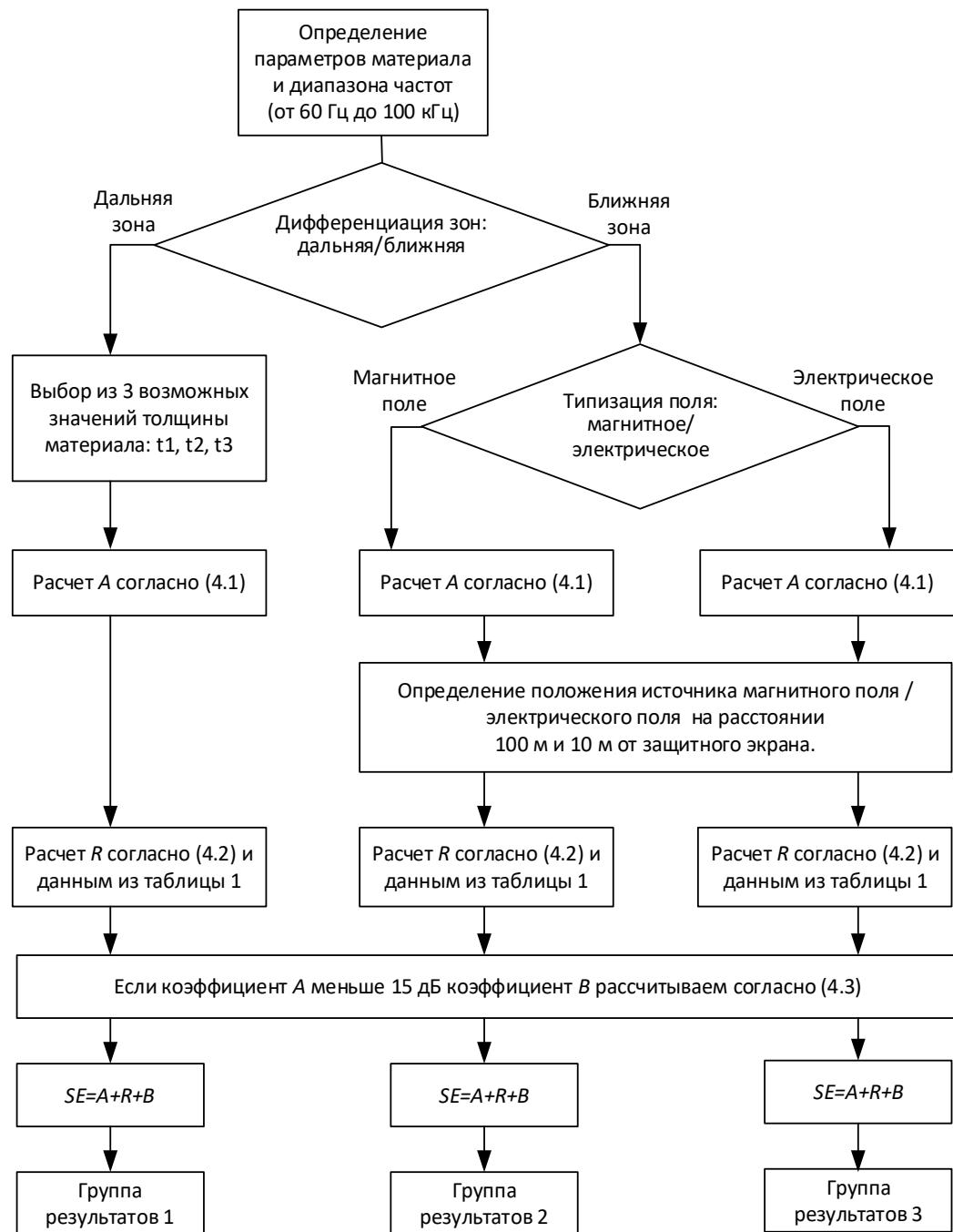


Рисунок 4.1 – Алгоритм процесса анализа эффективности экранирования

$$A = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log(e) [dB], \quad (4.1)$$

где t – толщина экрана, δ – глубина проникновения электромагнитной волны, которая зависит от частоты и параметров материала, $\log(e)$ – натуральный логарифм.

$$R = C + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r} \right) \left(\frac{1}{f^n r^m} \right) [dB], \quad (4.2)$$

где σ_r – удельная электропроводность материала, μ_r – относительная магнитная проницаемость материала, f – частота электромагнитной волны, n, m – показатели степени, зависящие от материала и условий распространения волны, C – константа, связанная с параметрами системы (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Константы для выражения (4.2)

Тип поля	C	n	m
Электрическое поле	322	3	2
Плоская волна	168	1	0
Магнитное поле	14,6	-1	-2

$$B = 20 \log(1 - e^{\frac{-2t}{\delta}}) [dB]. \quad (4.3)$$

где t – толщина экрана, δ – глубина проникновения электромагнитной волны, которая зависит от частоты и параметров материала.

$$SE = A + R + B [dB], \quad (4.4)$$

Результаты анализа для каждого исследуемого материала можно разделить на три основные группы.

Группа 1 включает результаты анализа эффективности экранирования для плоских волн и представляет собой функцию эффективности экранирования в зависимости от частоты для 3 вариантов толщины экрана (t_1, t_2 и t_3). Это позволяет оценить, как выбор толщины материала экрана влияет на конечную эффективность экранирования.

Группа 2 включает результаты исследования эффективности экранирования электромагнитных полей, источниками сильного тока и низкого напряжения, находящимися в ближнем поле (магнитные поля). В этой группе анализ проводится для фиксированной толщины экрана (t). Также

рассматриваются два варианта расстояния от источника помех (r_1 и r_2), что позволяет оценить влияние расстояния на эффективность экранирования.

Группа 3 аналогична группе 2, но учитывает электромагнитные поля, создаваемые источниками высокого напряжения и низкого тока (электрические поля).

Таким образом, алгоритм обеспечивает комплексное представление эффективности экранирования для различных типов волн и условий воздействия.

Предложенный вычислительный алгоритм, реализован в среде MATLAB (Приложение Б) и на основании анализа электромагнитных и физических параметров материалов позволяет определить показатели их эффективности по экранированию электромагнитных полей в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. Исследовано четыре варианта отечественных материалов: два ферромагнитных металлических сплава с высокой магнитной проницаемостью (79НМ и 50Н), аморфный сплав (АМАГ–170) и один проводник (медь марки М00К). Результаты, полученные с использованием предложенного алгоритма, позволяют выполнить эффективное экранирование корпусов чувствительного оборудования киноконцертных комплексов от воздействия электромагнитных полей. Это позволяет значительно повысить электромагнитную совместимость оборудования, минимизируя нежелательные помехи и обеспечивая надежную работу систем в условиях сложной электромагнитной обстановки.

При выборе материала, используемого для экранирования, необходимо учитывать два параметра: магнитную проницаемость и электропроводность. Проводники, например такие как медь – доступный вариант в качестве экранирующего материала для требуемого ослабления помех за счет явления отражения (R). С другой стороны, существуют сплавы, которые благодаря своей высокой магнитной проницаемости эффективно ослабляют излучение за счет поглощения.

Для исследования выбраны четыре материала с разными электромагнитными свойствами: *М00К, 79НМ, 50Н, АМАГ–170*.

Сплавы железа и никеля обладают запоминающимися магнитными свойствами, например сплав *79НМ* состоит из 79% никеля и примерно 21% железа, а сплав *50Н* состоит из 50% никеля, примерно 49% железа, а также меди, марганца и кремния. Оба представляют собой железоникелевые сплавы с высокими значениями магнитной проницаемости. Альтернатива представленным железоникелевым сплавам – аморфный сплав *АМАГ-170* на основе 80 % железа с добавлением кремния и бора. *АМАГ-170* имеет лучшие магнитные свойства, чем *79НМ* и *50Н*, однако сплав имеет ниже значение удельной электропроводности σ_r .

Технические параметры и характеристики исследуемых материалов, в частности, доступны: для *M00К* в ГОСТ 859–2014 [118], для *79НМ*, *50Н* в ГОСТ 10994–74 [119], для *АМАГ-170* в технических условиях [120].

Зависимость относительной магнитной проницаемости от частоты представлены на рисунке 4.2. Результаты получены в приложении MATLAB, где на основании информации, доступной из технической документации исследуемых материалов аппроксимированы значения относительной магнитной проницаемости с максимальной погрешностью в 5%.

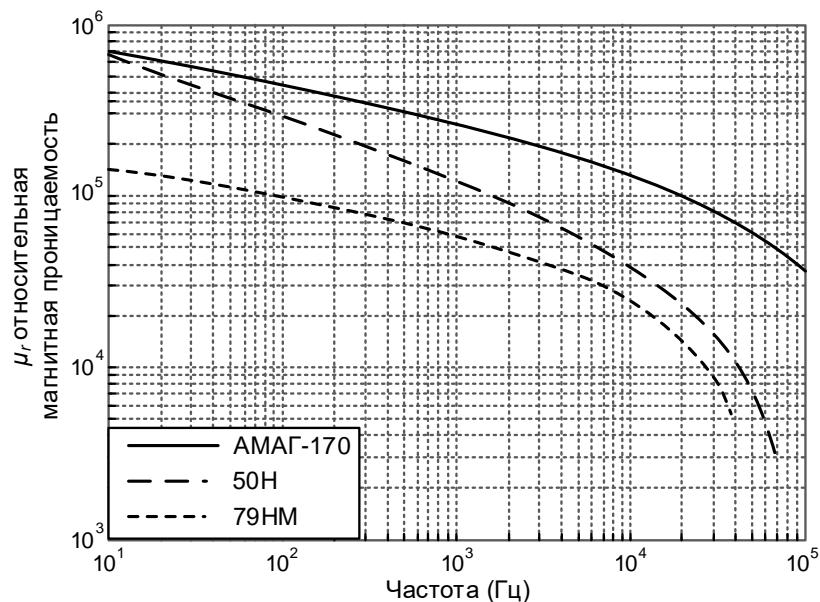


Рисунок 4.2 – Магнитная проницаемость материалов в зависимости от частоты

Скин-эффект при выборе толщины

Выбор толщины t_1 , t_2 и t_3 не должен быть произвольным, так как необходимо учитывать значение глубины скин-слоя (δ). Толщины экрана, превышающей δ , достаточно, чтобы гарантировать поглощение помех не менее чем на 63% от их первоначального значения [121].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} [м] \quad (4.5)$$

Согласно выражению (4.5), значение δ уменьшается по мере увеличения частоты, поэтому обеспечение требуемой толщины для поглощения помех на частоте 50 Гц обеспечивает удовлетворительные характеристики в области ВЧ. В таблице 4.3 показаны значения δ для четырех материалов на частоте 50 Гц.

Таблица 4.3 – Основные параметры исследуемых материалов

Материал	σ_r , См/мм	μ_r ,	δ , мм
79НМ	0,035	см. рисунок 2	0,0011
50Н	0,026	см. рисунок 2	0,0018
М00К	0,999	1	65,01
АМАГ-170	0,015	См. рисунок 2	0,0013

Эффективность экранирования в дальней зоне

Согласно алгоритму (рисунок 4.2), после определения значений σ и μ и дифференциации на дальнюю и ближнюю зону, следующим этапом будет выбор толщины экранирующего слоя для защиты от ЭМП в дальней зоне. Для расчетов выбраны следующие значения толщины материала: $t_1 = 0,15$ мм, $t_2 = 0,2$ мм, $t_3 = 0,25$ мм. t_1 , t_2 и t_3 должны быть больше значения δ исследуемых материалов для частот выше 50 Гц, что позволяет гарантировать минимальные значения поглощения.

Материалы толщиной $t_1 = 0,15$ мм

Используя уравнение (4.1) оценено затухание сигнала вследствие явления

поглощения (A). На рисунке 4.3 показан процесс поглощения плоской волны материалами толщиной $t_1 = 0,15$ мм.

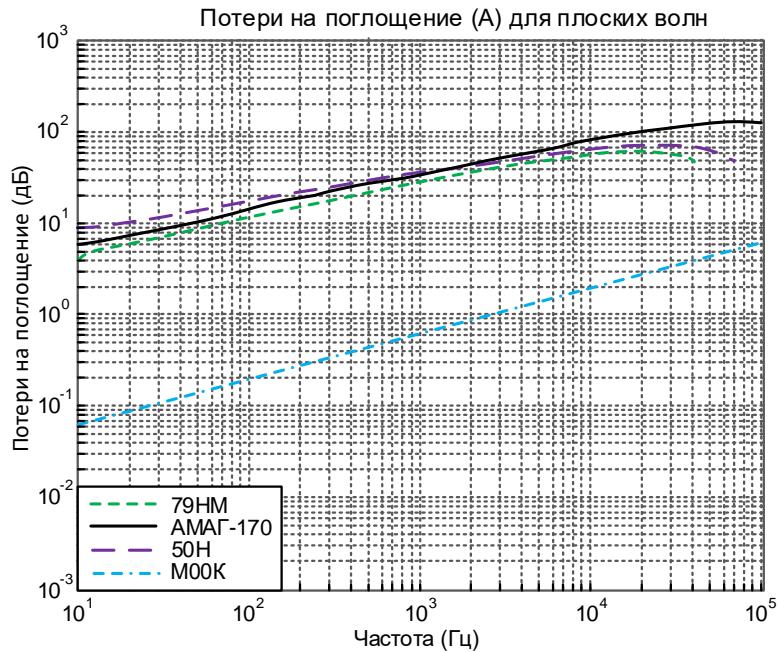


Рисунок 4.3 – Затухание плоских волн вследствие явления поглощения A
($t_1 = 0,15$ мм)

Для обеспечения требуемого значения коэффициента поглощения A предпочтительнее использование магнитных металлических сплавов. Магнитные материалы более эффективны при явлении поглощения, в то время как $M00K$ не позволяет обеспечить затухание более чем на 10 дБ в рассматриваемых условиях. В основе механизма экранирования проводников лежит явление отражения, где коэффициент R не зависит от толщины материалов.

Также замечено, что поглощение постепенно увеличивается с увеличением частоты. Факт, который можно вывести из выражения (4.5) и (4.6).

$$A = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) [\text{dB}]. \quad (4.6)$$

На рисунке 4.4 показан процесс затухания плоской волны за счет явления отражения (R) для материалов при толщине $t_1 = 0,15$ мм.

Соотношение электропроводности σ_r и относительной проницаемости μ_r напрямую влияет на степень затухания при отражении. Материалы с высокими

значениями относительной проницаемости менее эффективны при отражении, среди исследуемых материалов.

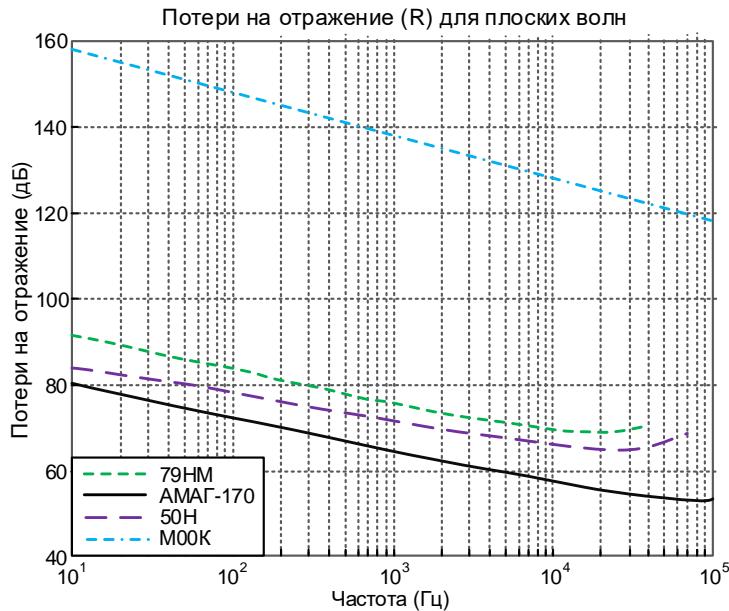


Рисунок 4.4 – Затухание плоских волн вследствие явления отражения R
($t_1 = 0,15$ мм)

Сумму поглощения и отражения ($A+R$) можно увидеть на рисунке 4.5. Установлено, что магнитные материалы: 79НМ, 50Н и АМАГ-170 менее эффективны по сравнению с другими материалами на частотах ниже 10 кГц. Несмотря на то, что магнитные материалы имеют лучшие показатели при поглощении (рисунок 4.3), медь М00К превосходит их благодаря значительному затуханию в результате отражения (рисунок 4.4).

Рисунок 4.5 не отражает реальный процесс затухания, т.к. необходимо добавить третий член — поправочный коэффициент многократного отражения B . На рисунке 4.6 представлены значения поправочного коэффициента B для исследуемых материалов. Установлено, что материалы с высокой магнитной проницаемостью меньше подвержены влиянию эффекта многократных отражений, поскольку их основным механизмом экранирования является затухание, основанное на явлении поглощения. Эффект многократного отражения B будет негативно сказываться на общей эффективности экранирования SE для материалов защиты, которых основана на явлении

отражения.

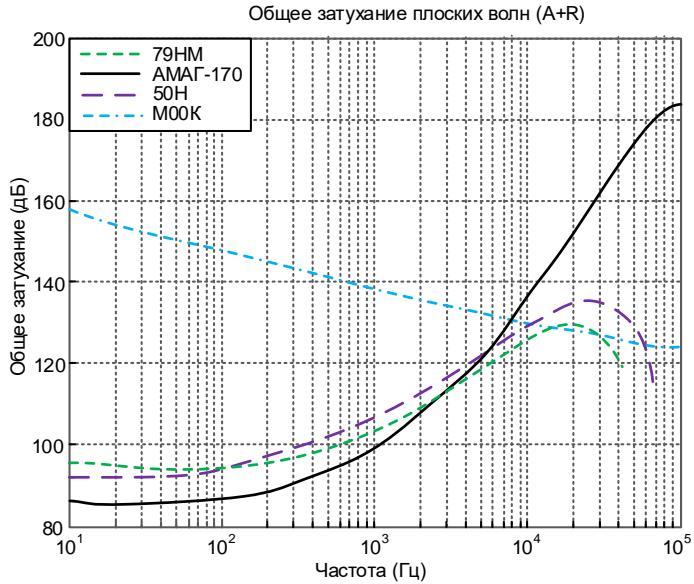


Рисунок 4.5 – Сумма затухания поглощения и отражения $A + R$ ($t_1=0,15\text{мм}$).

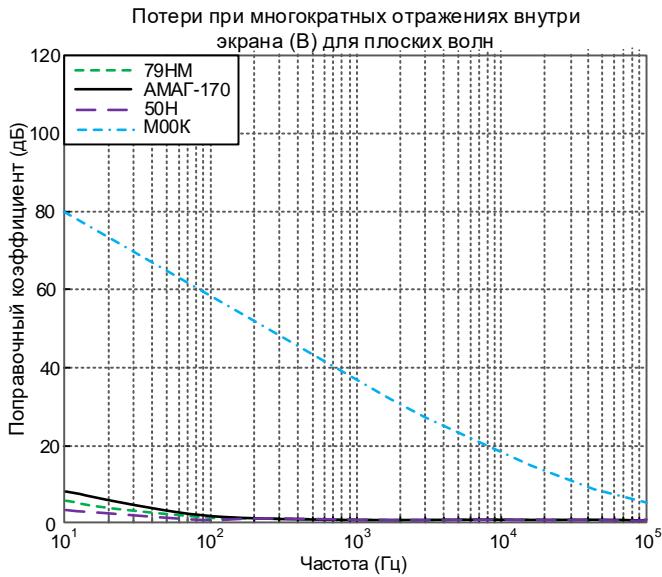


Рисунок 4.6 – Поправочный коэффициент при многократных отражениях B ($t_1 = 0,15$ мм).

После включения в уравнение коэффициента B можно оценить общую эффективность экранирования, определяемую согласно (4.4) и показанную на рисунке 4.7. *M00K* по-прежнему эффективен в определенных диапазонах частот, однако магнитные материалы существенно превосходят по эффективности *M00K*, особенно на частотах выше 1 кГц.

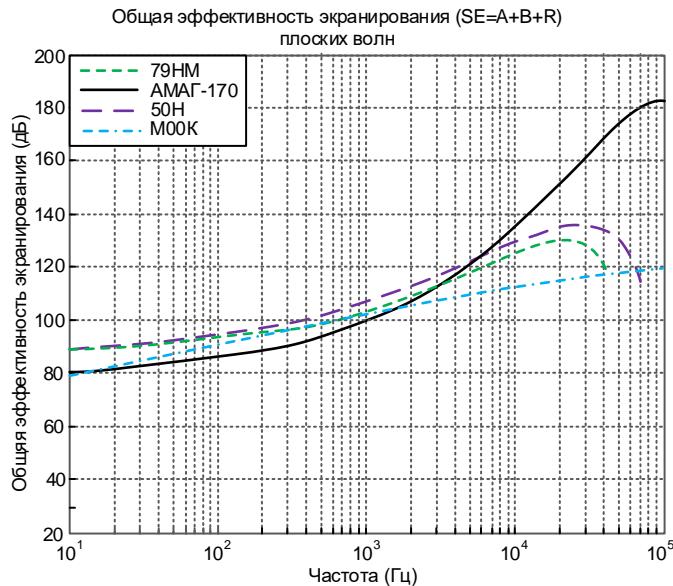


Рисунок 4.7 – Общая эффективность экранирования SE ($t_1 = 0,15$ мм)

АМАГ-170 имеет самые высокие значения магнитной проницаемости среди трех исследуемых магнитных материалов (рисунок 4.2), однако у него самая низкая эффективность экранирования SE в диапазоне от 50 Гц до 1 кГц. Это связано с тем, что электропроводность данного материала, хотя и ниже по сравнению с медью, все же существенно влияет на электромагнитное экранирование. В частности, значения электропроводности *АМАГ-170* – самые низкие среди трех рассматриваемых магнитных материалов.

Материалы толщиной $t = 0,2$ мм

На рисунке 4.8 показана эффективность экранирования SE для плоских волн четырех исследуемых материалов с толщиной $t_2 = 0,2$ мм.

Поглощение (A) прямо пропорционально толщине материала, что можно проверить с помощью выражения (4.6). Коэффициент отражения (R) не меняется с увеличением толщины экранирующего материала, однако поправочный коэффициент B становится меньше с увеличением толщины. Коэффициент B уменьшается, поскольку материал с большей толщиной обеспечивает поглощение падающей электромагнитной волны перед повторным отражением на второй границе среды.

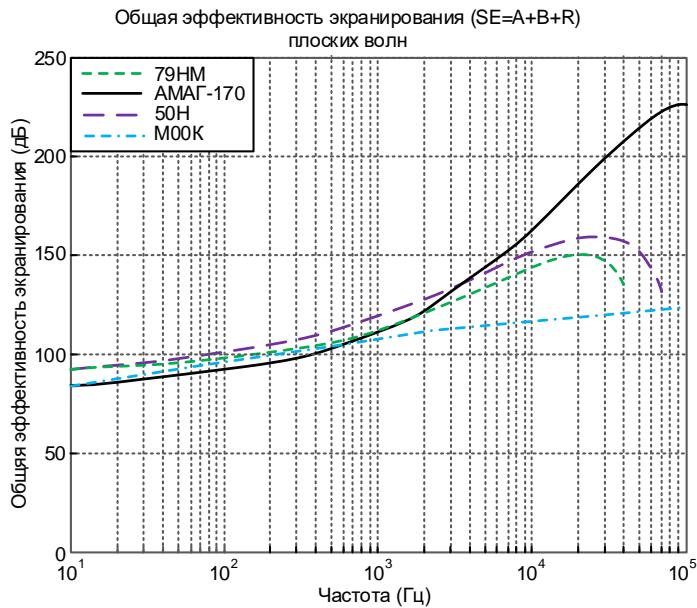


Рисунок 4.8 – Общая эффективность экранирования SE ($t_2 = 0,2$ мм).

Увеличение эффективности магнитных материалов наблюдается на частотах выше 10 кГц, с пиками достигающими 226 дБ на частоте 100 кГц. Небольшая корректировка толщины магнитных материалов позволяет увеличить эффективность экранирования.

Материалы толщиной $t = 0,25$ мм

Результаты оценки эффективности экранирования для материалов толщиной $t_3 = 0,25$ мм, представлены на рисунке 4.9. Увеличение толщины магнитных материалов улучшает эффективность экранирования на более высоких частотах. *АМАГ-170* толщиной 0,25 мм обеспечивает эффективность свыше 250 дБ на частотах выше 30 кГц. *79НМ* и *50Н* также демонстрируют эффективность свыше 150 дБ, но на высоких частотах наблюдается резкое падение вследствие явления проницаемости (рисунок 4.2). Медь марки *М00К* не демонстрирует значительных изменений в эффективности экранирования с увеличением толщины материала, хотя наблюдается небольшое улучшение благодаря уменьшению поправочного коэффициента B .

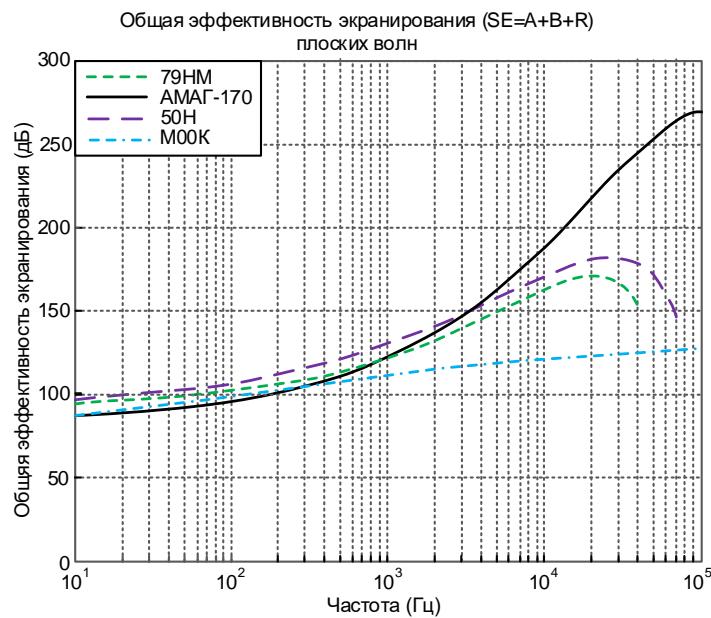


Рисунок 4.9 – Общая эффективность экранирования SE ($t_3 = 0,25$ мм)

Эффективность экранирования в ближней зоне

Алгоритм представленный на рисунке 4.1 учитывает, что в ближней зоне электромагнитное поле имеет ярко выраженный магнитный или электрический характер. Данная типизация необходима ввиду различий в поведении электрических и магнитных полей в ближней зоне. Согласно [122], ближняя зона обеспечивается на расстояниях, меньших $\lambda/2\pi$, где λ — длина волны для самой высокой частоты в рассматриваемом диапазоне. Для частоты 100 кГц длина волны составляет $\lambda = 3000$ м, таким образом, при $r < 447$ м можно утверждать, что мы находимся в ближней зоне.

Для анализа выбраны два расстояния от источников электрического и магнитного полей: $r_1 = 100$ м и $r_2 = 10$ м. Дальнейший анализ выполнен для материалов толщиной 0,15 мм.

Эффективность экранирования магнитных полей

В результате применения алгоритма для расчета эффективности экранирования при $r_1 = 100$ м получен график, который показан на рисунке 4.10.

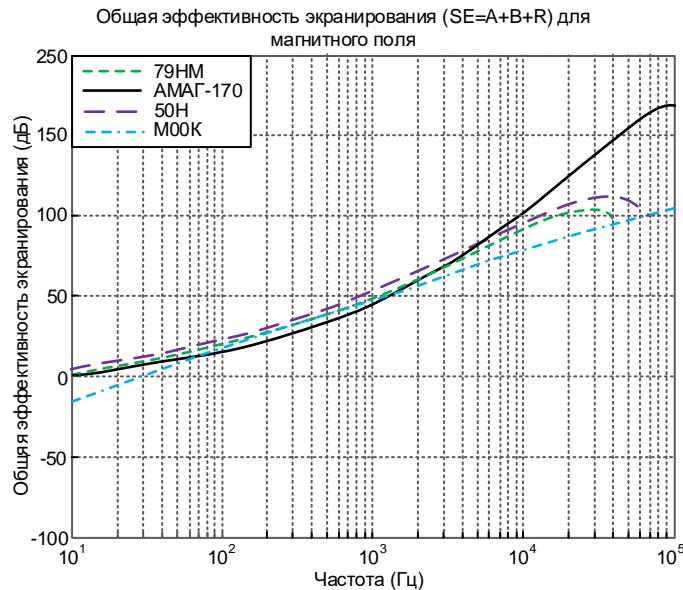


Рисунок 4.10 – Общая эффективность экранирования SE для магнитных полей (с источником на расстоянии 100 метров от экранирующего материала)

При сравнении трех компонентов общей эффективности экранирования для плоских волн и магнитного поля наблюдается отсутствие разницы в значениях коэффициента поглощения (A). Это свидетельствует о том, что процесс поглощения происходит одинаково как для плоских волн, так и для магнитных полей. Изменение коэффициента B незначительно: разница составляет менее 1 дБ. Коэффициент отражения R зафиксирован на порядок меньше для магнитных полей, что указывает на неэффективность затухания, основанного на явлении отражения, в качестве механизма экранирования.

Важно подчеркнуть, что влияние снижения значения коэффициента R более заметно на низких частотах. Для $M00K$ эффективность экранирования на частоте 100 Гц, при воздействии плоских волн достигает значения $SE_{100\text{Гц}} = 96,23$ дБ, для магнитных полей составляет $SE_{100\text{Гц}} = 17,38$ дБ, разница в эффективности экранирования составляет 81,93%. Это означает, что добиться эффективного экранирования магнитных полей труднее, чем плоских волн, особенно в области низких частот.

При расстоянии от источника магнитного поля $r_2 = 10$ м, можно наблюдать результаты, представленные на рисунке 4.11.

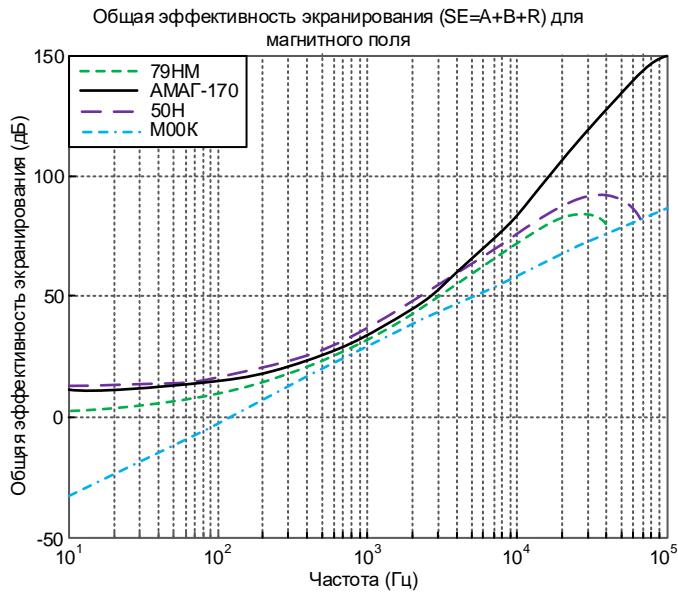


Рисунок 4.11 – Общая эффективность экранирования SE для магнитных полей (с источником на расстоянии 10 метров от экранирующего материала)

Чем меньше становится расстояние между источником магнитного поля и защитным экраном, тем менее эффективным становится экранирование. Коэффициент отражения R становится все меньше по мере приближения источника помех, в то время как A поглощение не меняется, а материалы с низкой магнитной проницаемостью как медь $M00K$ становятся все менее эффективными при экранировании магнитных полей.

Эффективность экранирования электрических полей

Для оценки эффективности экранирования электрических полей при постоянной толщине экрана $t_1=0,15$ мм выбраны расстояния до источника ЭМП: $r_1=100$ м и $r_2=10$ м. Общая эффективность экранирования (SE) для источника помех на расстоянии $r_1=100$ м представлена на рисунке 4.12.

Все материалы демонстрируют увеличение коэффициента отражения R , в частности, в области НЧ, где выполнить экранирование электрических полей становится проще, чем экранирование плоских волн. Однако эффективность экранирования SE становится все ниже с увеличением частоты, и данный факт также можно вывести с помощью выражения (4.2).

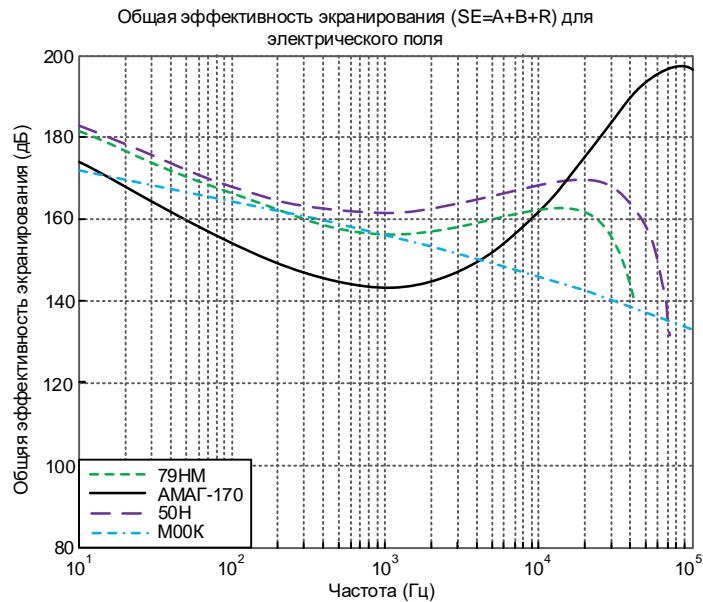


Рисунок 4.12 – Общая эффективность экранирования SE для электрических полей (с источником на расстоянии 100 м от экранирующего материала)

На рисунке 4.13 показана общая эффективность экранирования для электрических полей при $r_2 = 10$ м.

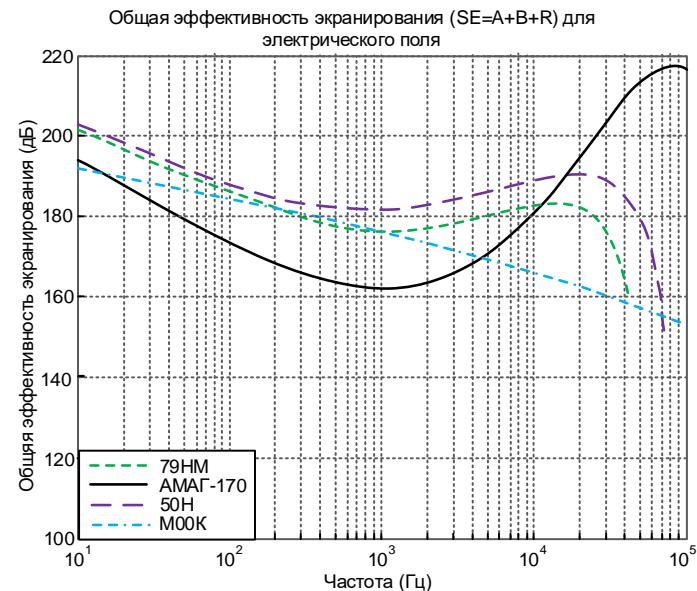


Рисунок 4.13 – Общая эффективность экранирования SE для электрических полей (с источником на расстоянии 10 м от экранирующего материала)

Экранирование магнитных полей становится более проблематичным с уменьшением расстояния r , а экранирование электрических полей напротив более эффективным. Общая эффективность экранирования электрических полей

(SE) увеличивается примерно на 20 дБ для всех материалов при изменении расстояния от 100 до 10 метров.

При увеличении расстояния r эффективность экранирования электрических полей уменьшается, пока не достигает значений, аналогичных эффективности экранирования плоских волн. Рисунок 4.14 наглядно демонстрирует различия в электромагнитном экранировании для каждого из упомянутых случаев.

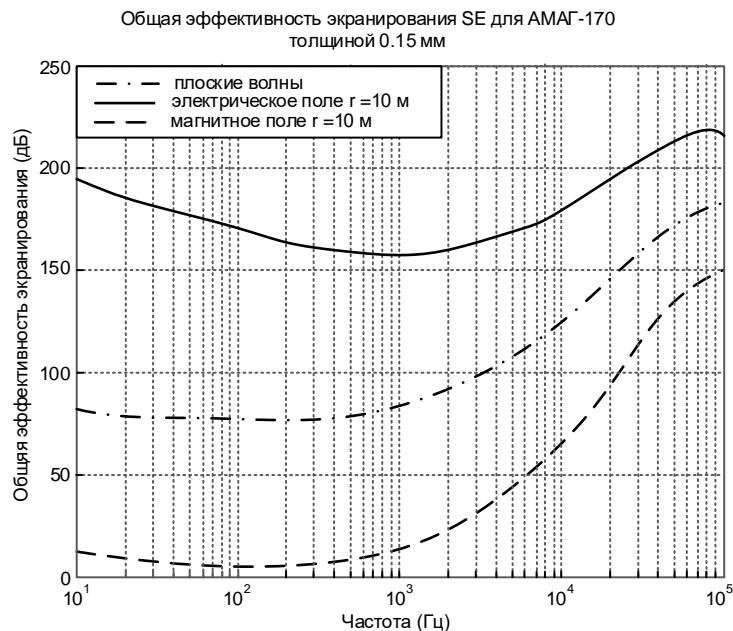


Рисунок 4.14 – Общая эффективность экранирования SE для $AMAG-170$ толщиной $t_1 = 0,15$ мм для электрических, магнитных полей и плоских волн.

Установлено, что при электромагнитном экранировании необходимо учитывать несколько факторов: тип и частоту ЭМП, толщину и электромагнитные свойства экранирующих материалов, а также расстояние между источником помех и областью, подлежащей экранированию.

Разработана структура и программная реализация алгоритма оценки эффективности экранирования с учётом характеристик используемых материалов.

Приведены результаты работы алгоритма по оценке эффективности применения ряда отечественных материалов, в их числе: ферромагнитные

сплавы (*79НМ* и *50Н*) и аморфный сплав (*АМАГ-170*), которые более эффективны для экранирования магнитных полей; материалы с высокой проводимостью и низкой проницаемостью, такие как *M00K*, которые более эффективны для экранирования электрических полей.

Показано, что магнитные материалы не менее эффективны, чем *M00K* при экранировании электрических полей, поскольку имеют низкие значения коэффициента многократного отражения и высокие значения коэффициента поглощения.

Разработанный алгоритм позволяет оценить эффективность различных материалов в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц, что даёт основание рекомендовать применение его при проектировании надежных и устойчивых к электромагнитным воздействиям защитных конструкций.

4.3 Аппаратно-программный комплекс проектирования гибридных помехоподавляющих фильтров

В разделе 1 приведены данные допустимых уровней кондуктивных помех и помех в виде электромагнитной эмиссии в окружающем пространстве, в том числе и от технологического оборудования, которое представлено в киноконцертном комплексе, а также приведены значения чувствительности радиоинформационной аппаратуры. Из приведённых данных следует, что даже при соблюдении нормированных значений уровней электромагнитных помех условия обеспечения ЭМС могут быть не выполнены.

Существует объективная необходимость на стадии проектирования радиоинформационной и электронной аппаратуры различного назначения а также на этапе проектирования технологических помещений культурно-зрелищных объектов, выполнить исследования с целью выяснения соблюдения требований обеспечения ЭМС и при невыполнении этих требований рекомендовать – меры и средства: от применения дополнительных помехоподавляющих фильтров до изменения концепции построения системы.

4.3.1 Обоснование и структура алгоритма исследования ЭМС в кондуктивной среде

Для исследования ЭМС в кондуктивных цепях разработана методика, которая представлена алгоритмом определения ЭМО, схема которого показана на рисунке 4.15. Данный алгоритм – является дальнейшим развитием алгоритма, приведённого в первом разделе (рисунок 1.4).

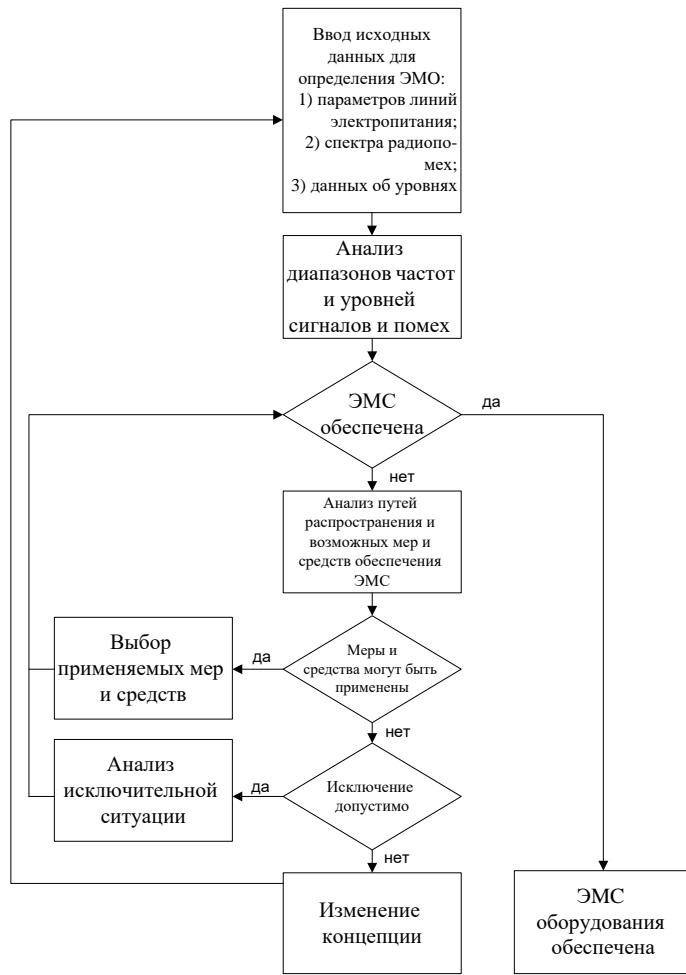


Рисунок 4.15 – Схема алгоритма анализа ЭМО в кондуктивных цепях

На основании приведённой выше схемы анализа ЭМО, разработаны программные средства для исследования ЭМС в кондуктивных цепях. Основное задание, возлагаемое на программу, – обеспечить анализ соответствия уровней кондуктивных помех нормам на допустимые уровни помех, указанные в разделе 1.

В случае, когда уровни помех превышают допустимые значения, программа выбирает из базы данных (БД) помехоподавляющих фильтров

необходимый фильтр в соответствии с введёнными параметрами источника и необходимой полосой частот радиоинформационной или электронной аппаратуры.

При организации вычислительного процесса использованы вычислительные алгоритмы для определения ЭМО в кондуктивных цепях. Выведенные результаты вычислений получают в формате вещественных чисел с 8-ми разрядами после запятой, которые принимают значения в диапазоне от 10^{-38} до 10^{38} . Точность вычислений соответствует стандарту IEEE 754 [123].

Выбор фильтра осуществляется путем подбора фильтра из БД, характеристика затухания (АЧХ) которого обеспечивает снижение уровня помех, возникающих в результате функционирования ИВЭП. Во время анализа в рассмотрение принимают тот интервал частот, в котором уровень возникающих помех превышает допустимые нормы для соответствующей электронной аппаратуры [124].

Описание программы. Программа разработана в среде Borland C++ Builder 6 на языке программирования C++ [125]. Интерфейс программы – окно с полями для ввода параметров анализируемого ИВЭП: верхней и нижней частот диапазона, в котором производится анализ, полученные в результате моделирования уровни помех в сети электропитания, создаваемые в результате функционирования ИВЭП, а также – областью построения графиков и вывода результатов анализа и проведённых вычислений.

Исходный код разработанной программы содержится в трех файлах:

Unit1.cpp – основные программные методы и переменные;

Unit1.h – класс TForm1, подключение библиотек;

FloatList.h – класс для работы со связанными списками.

Все промежуточные данные о графиках функций помещены в связанные списки.

Связанный список – структура данных, состоящая из узлов, каждый из которых содержит как собственно данные, так и одну или две ссылки («связки») на следующий или предыдущий узел списка. Принципиальным преимуществом

связанных списков перед массивом является структурная гибкость: порядок элементов связанного списка может не совпадать с порядком расположения элементов данных в памяти компьютера, а порядок обхода списка всегда задаётся его внутренними связями.

Выбор фильтра происходит путём алгебраического суммирования уровней помех и затухания фильтра на частотах, где уровень помех превышает допустимые значения. Выбор фильтра производится из внесённой в программу БД помехоподавляющих фильтров [126].

Файлы входных данных и файлы АЧХ помехоподавляющих фильтров имеют формат CSV (Comma-Separated Values), где в качестве разделителя использована точка с запятой (;). Файлы фильтров сохранены в папке «\Filters\».

На рисунке 4.16 изображено окно программы и обозначены элементы пользовательского интерфейса.

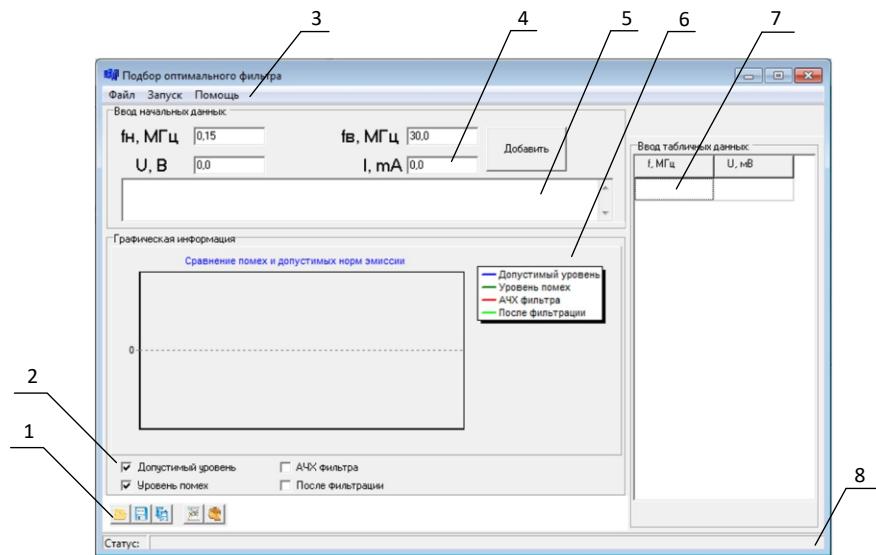


Рисунок 4.16 – Окно программы выбора фильтра:

1 – меню быстрого вызова; 2 – флажки для включения и выключения необходимых графиков; 3 – основное меню; 4 – поле ввода начальных данных; 5 – поле для вывода служебной информации; 6 – поле для вывода графиков; 7 – таблица для ввода и редактирования данных (по горизонтали логарифмическая шкала); 8 – строка статуса.

При выборе «Основное меню->Файл->Открыть», появляется диалоговое окно (рисунок 4.17), в котором нужно выбрать файл с данными о помехах. Файл должен быть создан в формате CSV.

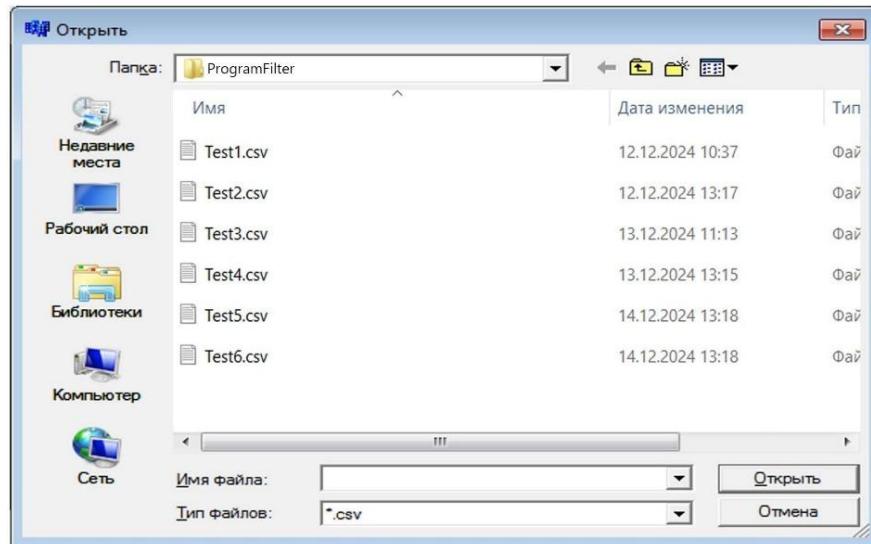


Рисунок 4.17 – Диалоговое окно выбора файла с данными о помехах

После выбора файла данные из него заносятся в таблицу (рисунок 4.16, указатель 7). После нажатия на кнопку «Рисовать» получим график, построенный по точкам, введенным в таблицу, и график допустимого уровня (рисунок 4.18).

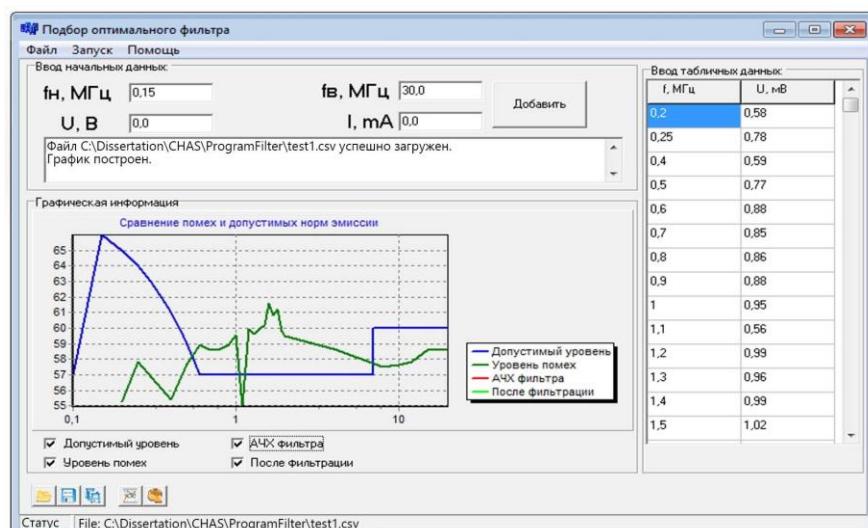


Рисунок 4.18 – Окно программы с выведенными графиками введённых данных и нормами допустимых помех

При нажатии на кнопку «Рассчитать» программа проведет расчет и определит подходящий фильтр из БД, находящейся в папке «\Filters\». Теперь если отметить флажками пункты «АЧХ фильтра» и «После фильтрации» (рисунок 4.16, указатель 2) программа построит выбранные графики (рисунок 4.19).

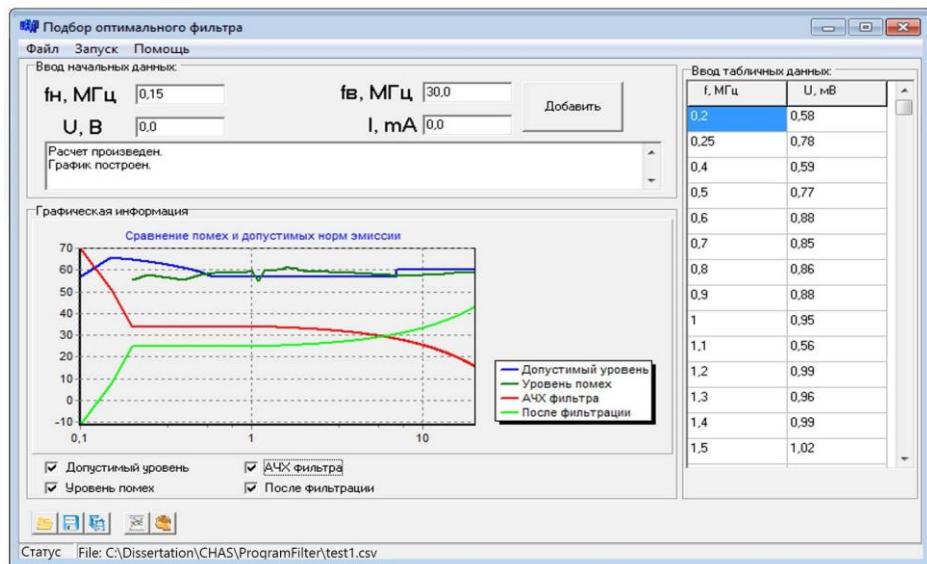


Рисунок 4.19 – Окно программы с выведенными графиками допустимых уровней данных о помехах, АЧХ выбранного фильтра и результирующего графика

Сохранить информацию можно нажав на кнопку «Сохранить» или «Файл -> Сохранить» или «Сохранить как».

Пример функционирования программы. В программу заложена возможность вводить данные в таблицу для ввода данных (рисунок 4.16, указатель 7). Первый столбец – частота, на которой проводился замер, второй столбец – уровень кондуктивных помех в милливольтах. После нажатия кнопки «рисовать» программа построит график зависимости уровня в децибелах, за базис принята величина в 1 мкВ, от частоты указанной в герцах на логарифмической шкале.

В программу внесены результаты моделирования модели понижающего преобразователя (таблица 4.4) и получены следующие результаты (рисунок 4.20).

Таблица 4.4 – Значения уровня помех обобщенной модели понижающего преобразователя

№ точки	f , МГц	L , дБ[1В]
1	0.6	– 3.88
2	0.7	– 43.88
3	1.8	– 14
4	2.1	– 49.88
5	3.2	– 17.82
6	3.8	– 69.88
7	5.2	– 23
8	6.2	– 59.88
9	6.9	– 23.97
10	7.1	– 71.88
11	7.8	– 26
12	8.0	– 61.88
13	9.2	– 26
14	10.2	– 64.26
15	10.9	– 24
16	11.7	– 70.88
17	12.6	– 24
18	13.2	– 70
19	14.1	– 23
20	15.4	– 67
21	16.2	– 18.88
22	17.1	– 72
23	18.4	– 18
24	19.4	– 68
25	21.1	– 20
26	22.1	– 66
27	24.2	– 23.88
28	25.5	– 74.88
29	27.2	– 27
30	29.4	– 64.88
31	29.7	– 30
32	29.9	– 61

На рисунке 4.20 видно, что уровень помех от ИВЭП типа понижающий преобразователь превышает допустимый уровень помех на частотах от 0,15 МГц до 2 МГц. В результате проведённых вычислений предложен фильтр F.AA.--.3330.ZA компании Arcotonics. График уровня помех после фильтрации не превышает допустимый уровень помех во всём рассматриваемом диапазоне частот 0,15 – 30 МГц. Данный фильтр позволяет сформировать ЭМО, при которой ЭМС обеспечена.

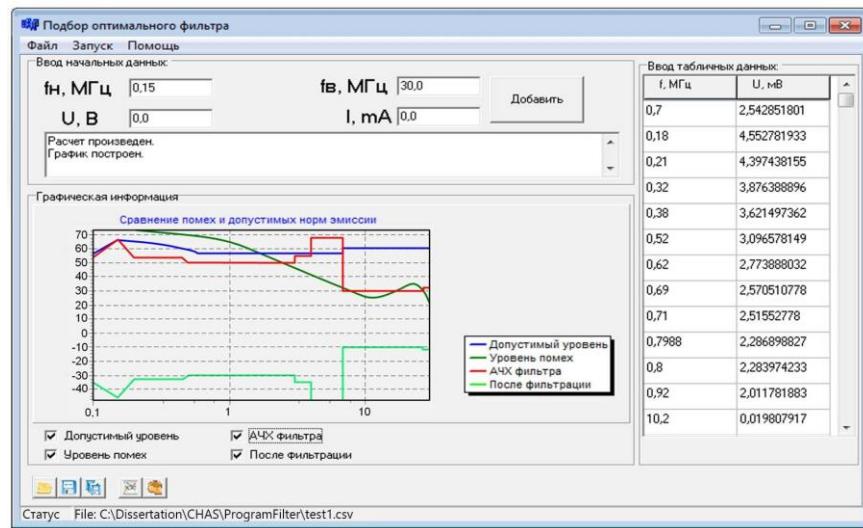


Рисунок 4.20 – Результаты расчета фильтра для ИВЭП типа понижающий преобразователь

4.4 Задача управления параметрами технических элементов оборудования киноконцертных комплексов

4.4.1 Особенности уменьшения коммутационных помех в полумостовом усилителе класса D

Благодаря активному развитию преобразовательной техники сегодня в линейке профессиональных решений для оснащения киноконцертного комплекса используют звуковые усилители класса D, например серия GXD от производителя QSC [127] или Drive Core от Crown [128].

Усилители звуковой частоты класса D обладают рядом преимуществ: наибольшим КПД; лучшими массогабаритными показателями; характеризуются

высокой энергоэффективностью в сравнении с классическими усилителями (класс А, В, АВ), но имеют один существенный недостаток, в виде значительного уровня создаваемых электромагнитных помех (ЭМП).

Нормативные документы предъявляют жесткие требования к уровню электромагнитной эмиссии импульсных преобразователей [129], что заставляет разработчиков решать задачу электромагнитной совместимости как на стадии проектирования, так и на стадии доработки, но уже с дополнительными затратами.

Современная тенденция развития преобразователей постоянного напряжения подразумевает повышение частоты переключения силовых полупроводниковых ключей (СПК) инвертора. Однако с ростом частоты переключения пропорционально увеличиваются и коммутационные потери, возникающие при работе СПК. Данная проблема решается путем применения различных снабберов (таблица 4.5), либо модификацией базового алгоритма управления, обеспечивающего в результате режимы включения силовых ключей преобразователя в нулях напряжения на ключе (переключение при нулевом напряжении (ПНН)) или выключения в нулях тока ключа (переключение при нулевом токе (ПНТ)), и следовательно, существенное уменьшение коммутационных потерь в силовых ключах в сравнении с режимом жесткой коммутации.

Таблица 4.5 – Классификация снабберов

Снабберы	Характеристика
Пассивные	LR, RC, RCVD – диссипативные, с рассеянием энергии коммутации в резисторах [130]
	L, C – бездиссипативные, с предварительным накоплением энергии коммутации в реактивностях и последующим возвратом энергии в нагрузку либо в источник питания [131]
Активные	с использованием дополнительных силовых полупроводниковых ключей [132]

Современное развитие силовой электроники позволило распространить достижения из области импульсных источников питания на устройства для усиления аудиосигналов. Представленные выше методы, которые используют для реализации преобразователей постоянного напряжения, целесообразно использовать для реализации импульсных усилителей мощности звуковой частоты.

В данном подразделе представлена реализация резонансной структуры для полумостового преобразователя, где достигнуто бездиссипативное переключение путем снятия напряжения на силовых полупроводниковых ключах во время переключения (режим ПНН).

В процессе реализации проведено исследование работы схемы резонансного полумостового усилителя мощности сигналов звуковой частоты ключевого типа и разработка методики определения L_R и C_R и пиковых значений тока в силовых полупроводниковых ключах для обеспечения режима мягкой коммутации и снижения уровня коммутационных помех.

Предложенная методология расчета резонансного контура и пиковых значений тока в силовых полупроводниковых ключах, позволяет упростить задачу разработки энергоэффективного усилителя класса Д уже на стадии проектирования и уменьшить коммутационные помехи в разрабатываемом усилителе.

Анализ работы схемы резонансного полумостового усилителя

Усилитель ключевого типа может быть реализован из конфигураций полумостовых и мостовых преобразователей. На рисунке 4.21 показан импульсный усилитель мощности звуковой частоты, предложенный в данной статье. Включение конденсатора C_R вместе с катушкой индуктивности L_R составляет резонансный контур, который обеспечивает режим мягкой коммутации.

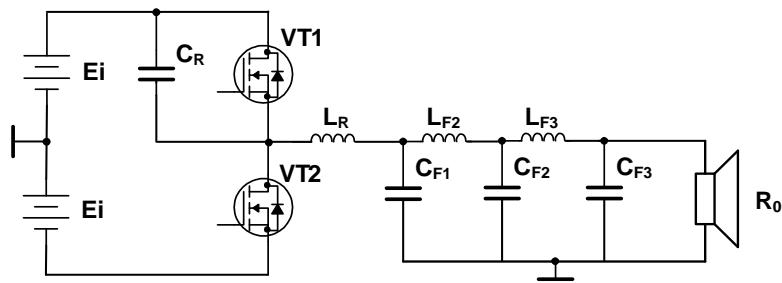


Рисунок 4.21 – Упрощенная схема рассматриваемого полумостового преобразователя

Для упрощения теоретического исследования коммутирующего усилителя, предложена эквивалентная схема, которая показана на рисунке 4.22.

При этом в процессе исследования приняты следующие допущения:

- ток и напряжение в нагрузке при переключении постоянны;
- транзисторы, диоды, катушка индуктивности, конденсатор и провода приняты как идеальные;
- напряжение на источниках питания без пульсаций.

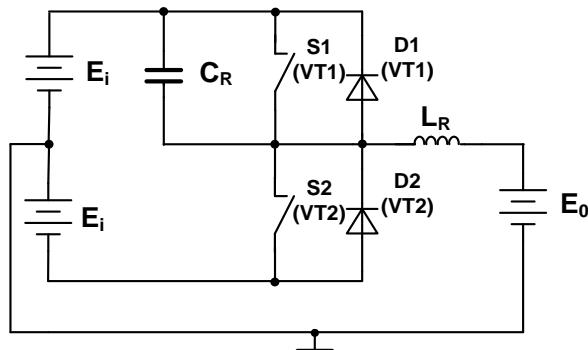


Рисунок 4.22 – Эквивалентная схема анализируемого полумостового преобразователя

Временные диаграммы сигналов напряжений и токов в различных компонентах в отдельные этапы работы резонансного полумостового преобразователя показаны на рисунке 4.23.

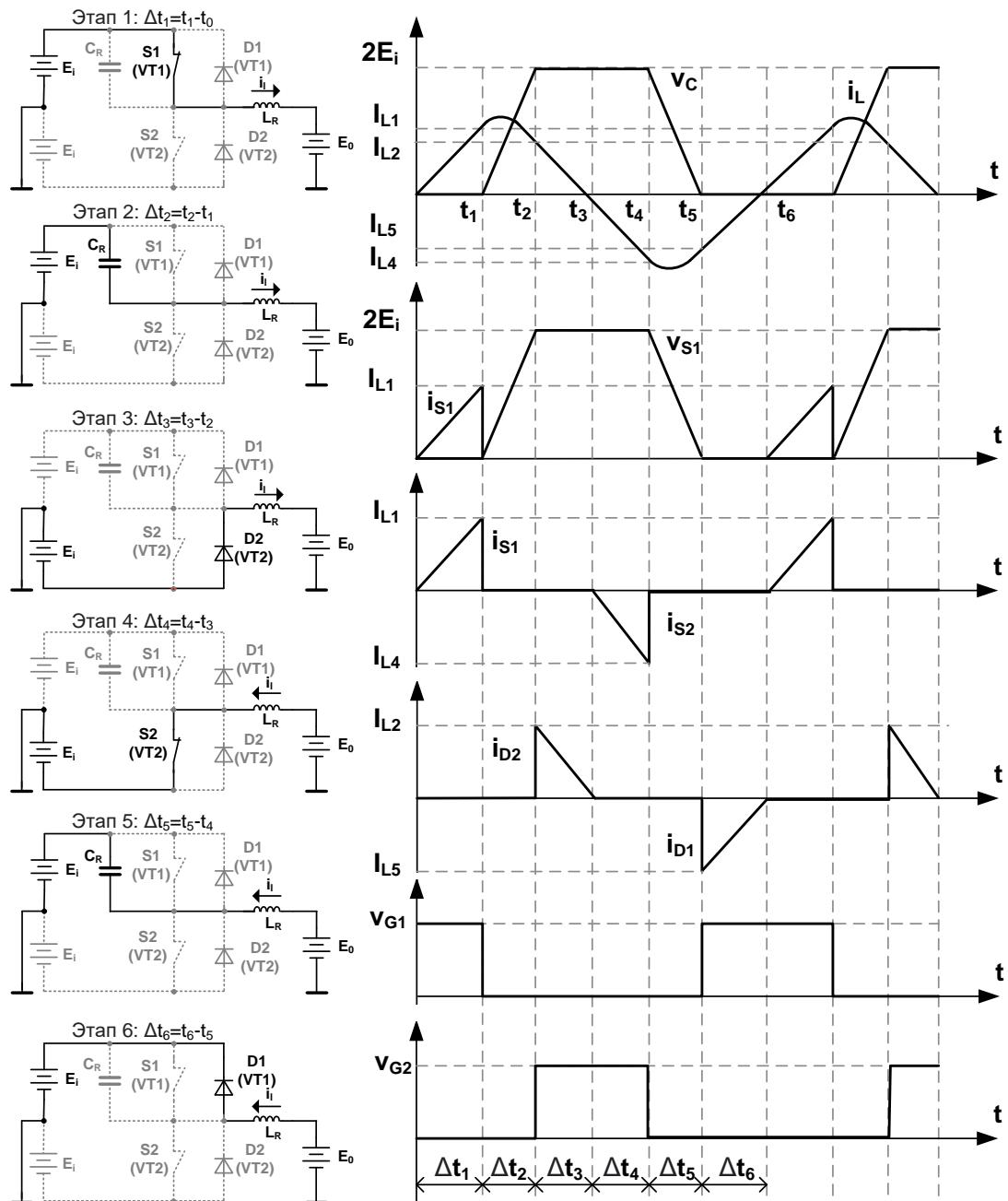


Рисунок 4.23 – Временные диаграммы иллюстрирующие отдельные этапы работы полумостового преобразователя

Поэтапный анализ работы схемы резонансного полумостового преобразователя представлен ниже.

Этап 1. Начальное условие: $V_c = 0$; $i_l = 0$.

Транзистор VT_1 открыт (переключатель S_1 замкнут). Ток в катушке индуктивности i_l линейно возрастает со временем в заданном положительном направлении. Напряжение V_c на конденсаторе остается нулевым. На этом этапе

мы имеем дело с передачей энергии от источника к нагрузке (в дополнение с накоплением энергии в катушке индуктивности). Этот этап заканчивается в момент t_1 , когда транзистор VT_1 получает команду на закрытие (переключатель S_1 разомкнут) и ток в катушке индуктивности достигает значения i_{L1} .

Этап 2. Начальное условие: $V_c = 0$; $i_l = I_{L1}$.

Транзистор VT_1 закрыт (переключатель S_1 разомкнут). Резонанс возникает в цепи E_i , C_R , L_R и E_0 . Начинает заряжаться конденсатор C_R . Ток в катушке индуктивности i_l изменяется синусоидально пока напряжение на конденсаторе V_c не достигнет значения $2E_i$ и ток в катушке индуктивности не достигнет значения I_{L2} .

Этап 3. Начальное условие: $V_c = 2E_i$; $i_l = I_{L2}$.

Прямое смещение, приложенное к диоду D_2 , приводит к прохождению тока через диод. Индуктивность L_R разряжается через цепь E_0 , E_i , D_2 , L_R и передает всю свою положительную энергию источнику E_0 . Ток i_l линейно уменьшается со временем, пока не прекратится. Напряжение конденсатора V_c остается равным $2E_i$. На этом этапе переключатель S_2 замыкается (транзистор VT_2 открывается).

Этап 4. Начальное состояние: $V_c = 2E_i$; $i_l = 0$.

Переключатель S_2 замкнут (транзистор VT_2 открыт), и через него проходит ток. Ток в катушке индуктивности i_l линейно уменьшается со временем до нуля. Напряжение на конденсаторе остается постоянным и равным $2E_i$. На этом этапе происходит передача энергии от источника к нагрузке в дополнение к накоплению энергии в катушке индуктивности. Этот этап заканчивается в момент времени t_4 , когда переключатель S_2 получает команду на размыкание (транзистор VT_2 закрыт) и ток в катушке индуктивности падает до уровня I_{L4} .

Этап 5. Начальное условие: $V_c = 2E_i$; $i_l = I_{L4}$.

Переключатель S_2 разомкнут (транзистор VT_2 закрыт). Резонанс возникает в цепи E_i , C_R , L_R и E_0 . Конденсатор C начинает разряжаться. Ток в катушке индуктивности i_l изменяется синусоидально до тех пор, пока напряжение на конденсаторе V_c не достигнет нулевого значения. На этом пятый этап заканчивается и ток в катушке индуктивности достигает значения I_{L5} .

Этап 6. Начальное условие: $V_c = 0$; $i_1 = I_{L5}$.

На диод D_1 подано прямое смещение и диод начинает пропускать ток. Катушка индуктивности L_R разряжается через цепь E_i , E_0 , L_R , D_1 . Этап продолжается до тех пор, пока ток в катушке индуктивности i_1 не достигнет нуля – тогда цикл завершится. Напряжение резонансного конденсатора V_c остается нулевым. На данном этапе переключатель S_1 получает команду на замыкание (транзистор VT_1 открыт) и цикл работы схемы завершается, возвращаясь к начальным условиям первого этапа.

Анализируя работу схемы на каждом из этапов, были выведены соответствующие динамические уравнения. Решение этих уравнений описывает поведение промежуточных состояний преобразователя. Используя полученные уравнения, были построены нормализованные кривые, которые показаны на рисунках 4.24 – 4.27, где:

$f^* = F_S / F_R$ – нормализованная частота;

F_S – частота переключения;

F_R – резонансная частота;

α – нормализованный пиковый ток на переключателе S_1 ;

α' – нормализованный пиковый ток на переключателе S_2 ;

$\beta = E_i / E_0$ – нормализованное выходное напряжение;

E_i – входное напряжение;

E_0 – выходное напряжение;

$P_0^* = P_0 / P_S$ – нормализованная выходная мощность;

P_0 – выходная мощность;

P_S – мощность потребляемая от источника питания.

На рисунке 4.24 показаны кривые, представляющие собой решение выражения (4.8), где показана зависимость f^* от α при различных значениях β , при этом x определяется выражением (4.9). Благодаря полученным кривым можно видеть, что для переключения без потерь и перенапряжений в широком диапазоне колебаний выходного напряжения необходимо иметь более низкое соотношение f^* .

$$f^* = \frac{\pi(\beta+1)}{\frac{a}{1-\beta} + \arccos(x) + \frac{1}{1+\beta} \left[(1-\beta) \sqrt{1-x^2} + ax \right]} \quad (4.8)$$

$$x = \frac{-(1-\beta^2) + \alpha \sqrt{\alpha^2 - 4\beta}}{(1-\beta)^2 + \alpha^2} \quad (4.9)$$

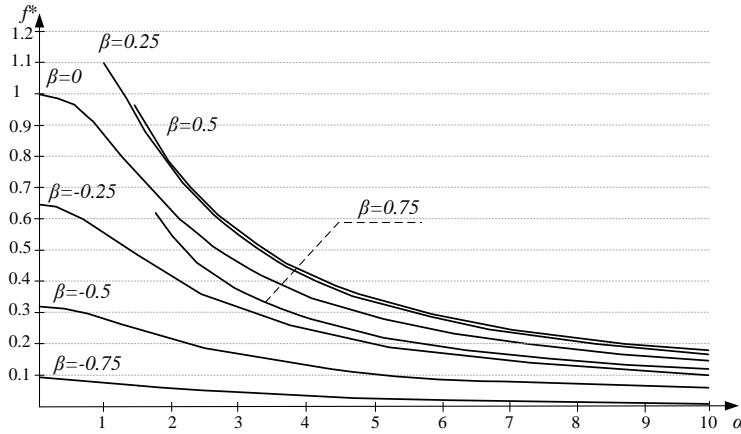


Рисунок 4.24 – Нормализованные кривые зависимости f^* от α

На рисунке 4.20 также показаны репрезентативные кривые для выражения (4.7). Данный график представляет зависимость f^* от β при различных значениях α . При низких соотношениях f^* преобразователь будет работать с более высокими значениями α , что подразумевает более высокие значения пикового тока.

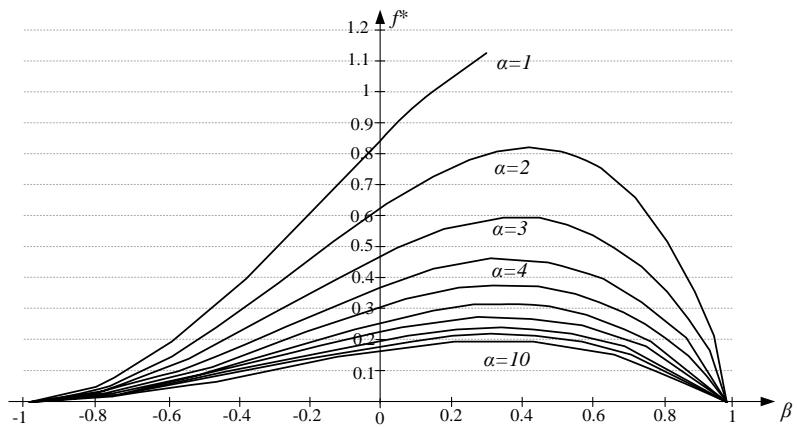


Рисунок 4.25 – Нормализованные кривые зависимости f^* от β

На рисунке 4.26 отображены кривые, представляющие решение выражения (4.9), где показана зависимость f^* от α' при различных значениях β , при этом x' определяется выражением (4.10).

$$f^* = \frac{\pi(\beta+1)}{-\frac{a}{1+\beta} + \arccos(x') - \frac{1}{1-\beta} \left[\alpha' x' - (1+\beta) \sqrt{1-x'^2} \right]}, \quad (4.9)$$

$$x' = \frac{-(1-\beta^2) - a' \sqrt{a'^2 + 4\beta}}{(1+\beta)^2 + a'^2}. \quad (4.10)$$

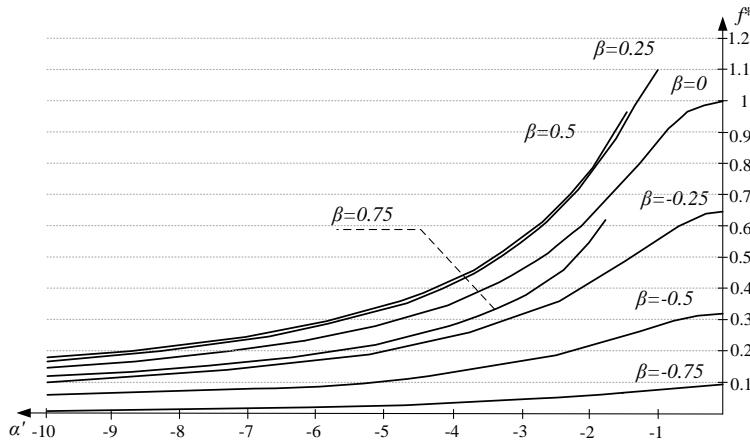


Рисунок 4.26 – Нормализованные кривые зависимости f^* от α'

На рисунке 4.27 показаны кривые, относящиеся к выражению (4.11), отображающие зависимость P_0^* от α при различных значениях β . На графике отсутствует кривая при значении $\beta = 0$ т.к. в этом состоянии выходная мощность преобразователя равна нулю.

$$P_0^* = \beta \frac{1}{2\pi} f^* [A + B], \quad (4.11)$$

$$\text{где: } A = \frac{\alpha^2}{2(1-\beta)} + \left(-(1-\beta)x + \alpha\sqrt{1-x^2} + (1-\beta) \right) + \frac{1}{2(1+\beta)} \left[(1-\beta)\sqrt{1-\chi^2} + \alpha x \right]^2,$$

$$B = \frac{\alpha'^2}{2(1+\beta)} + \left((1+\beta)x' + \alpha' \sqrt{1-x'^2} - (1+\beta) \right) + \frac{1}{2(1-\beta)} \left[\alpha' x' - (1+\beta) \sqrt{1-x'^2} \right]^2.$$

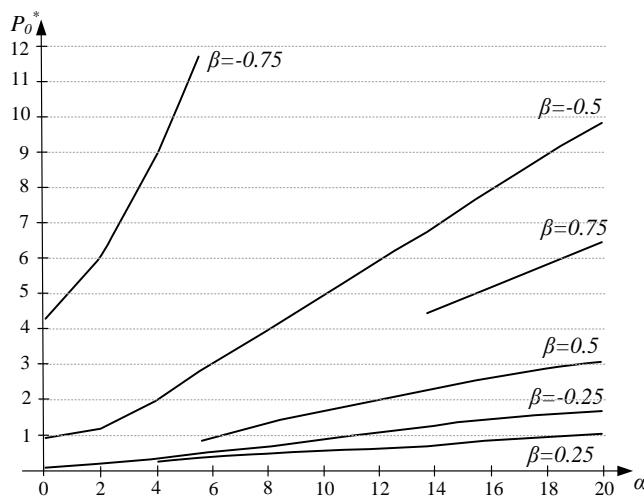


Рисунок 4.27 – Нормализованные кривые зависимости P_0^* от α

Представленные нормализованные кривые служат основой для разработки методологии проектирования импульсного коммутирующего усилителя.

Методика расчета L_R и C_R

Ниже представлен пример для демонстрации методологии проектирования коммутирующих усилителей с использованием резонансной полумостовой топологии, который включает пять шагов для определения L_R и C_R .

Рассмотрим усилитель со следующими параметрами: $E_i = 35$ В; $P_0 = 30$ Вт; $F_S = 200$ кГц.

Расчеты по определению L_R и C_R выполняются при условии максимальной выходной мощности с учетом фиксированной частоты переключения.

Шаг 1. На рисунке 4.24 видно большие значения α при малых значениях f^* , что соответствует более высоким пиковым значениям тока на переключателе. С другой стороны, более высокие значения f^* означают низкие пиковые значения тока на переключателе, что уменьшает диапазон выходного напряжения (β). Учитывая вышеизложенное, выбираем значение нормализованной частоты $f^* = 0,2$.

Шаг 2. Для выбранного частотного соотношения $f^* = 0,2$ диапазон составляет от $\beta = -0,5$ до $\beta = 0,5$. При максимальном значении $\beta = 0,5$ по кривым представленным на рисунке 4.24, находим значение $\alpha = 8,8$. При $\beta = 0,5$ с

помощью кривых на рисунке 4.26 определяем значение нормализованного пикового тока $\alpha' = -2,38$.

Шаг 3. При значениях $\alpha = 8,8$ и $\beta = 0,5$ по нормализованным кривым мощности (рисунок 4.27) определяем $P_0^* = 1,48$. Рисунок 4.27 позволяет использовать как значение α так и α' . Для модуля $|\alpha'|$, при значении $\alpha' = -2,38$, если поиск выполняется с наименьшим значением $\beta = -0,5$ на нормализованных кривых мощности, мы получим такое же нормированное значение мощности $P_0^* = 1,48$.

Шаг 4. С помощью P_0^* определяем характеристическое сопротивление Z_n :

$$Z_n = \frac{P_0^* E_i^2}{P_0} = 60,43 \Omega.$$

Шаг 5. Значения L_R и C_R вычисляем следующим образом:

$$C_R = \frac{f^* T}{2\pi Z_n} = 2,63 \text{ нФ},$$

где $T = 1 / F_S$.

$$L_R = \frac{1}{(2\pi F_R)^2 C_R} = 9,62 \text{ мкГн}.$$

С помощью значений α и α' возможно также определить пиковые токи в силовых полупроводниковых ключах:

для значения $\alpha = 8,8$:

$$I_{L1} = \frac{\alpha E_i}{Z_n} = 5,09 \text{ А};$$

для значения $\alpha' = -2,38$:

$$I_{L4} = \frac{\alpha' E_i}{Z_n} = -1,38 \text{ А}.$$

Благодаря найденным значениям тока, процедура определения параметров силовых транзисторов для резонансного полумостового усилителя значительно упрощена. Для большей точности при выборе СПК для проектируемого усилителя можно также рассчитать средний и действующий токи, как функцию от α , α' и β .

4.4.2 Моделирование работы схемы полумостового усилителя класса D с мягкой коммутацией в среде Multisim и сравнение методов расчета

Цель симуляции в интерактивном эмуляторе Multisim 14 – проверка результатов теоретического исследования частотных характеристик усилителя в ключевом режиме.

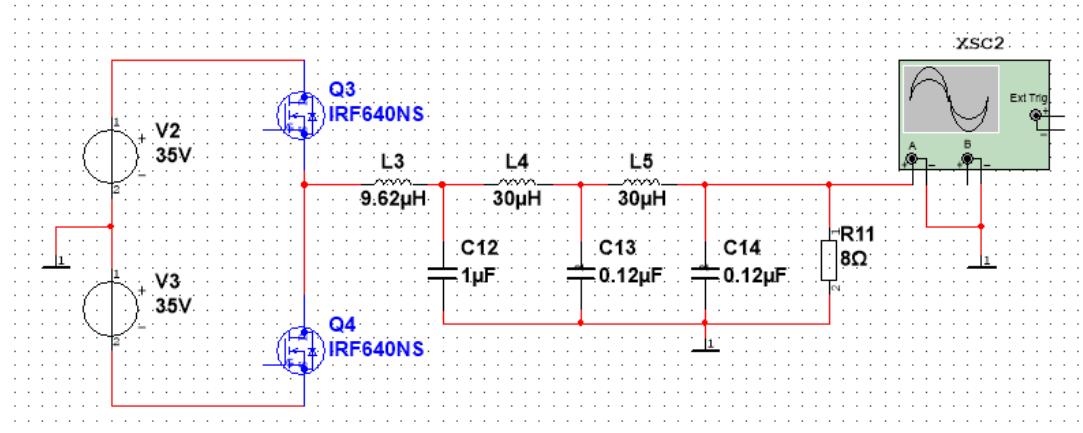


Рисунок 4.28 – Полумостовая схема ключевого (класса Д) УМЗЧ с мягкой коммутацией.

На рисунке 4.28 показана смоделированная схема ключевого усилителя мощности с мягкой коммутацией. Результаты моделирования демонстрируют работу усилителя ключевого типа для входного синусоидального сигнала 10 кГц. Использована коммутируемая частота 200 кГц. На рисунках 4.29а – 4.29е представлены результаты моделирования. В частности, на рисунке 4.29е показано выходное напряжение, которое демонстрирует работоспособность коммутирующего усилителя.

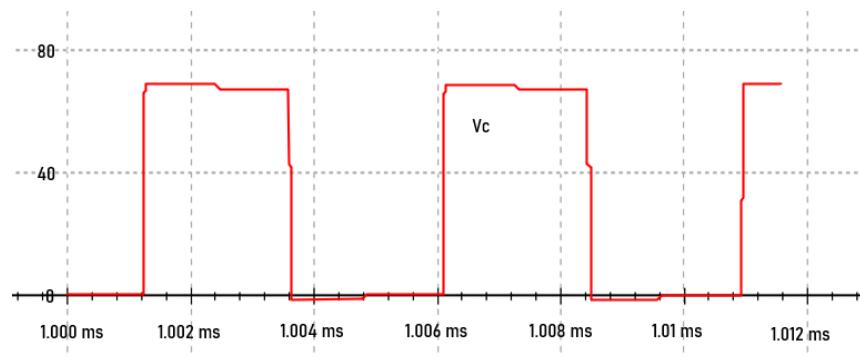


Рисунок 4.29а – Резонансное напряжение конденсатора.

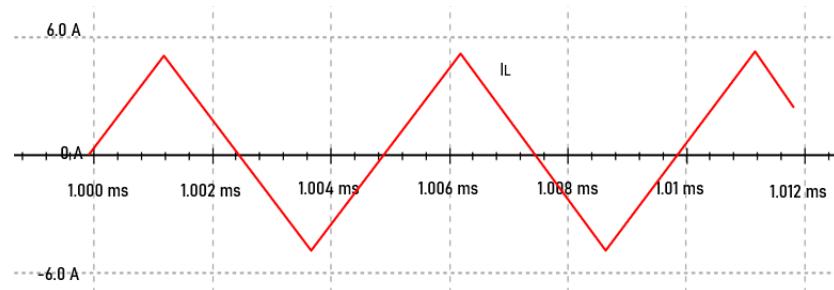


Рисунок 4.29б – Резонансный ток на катушке индуктивности.

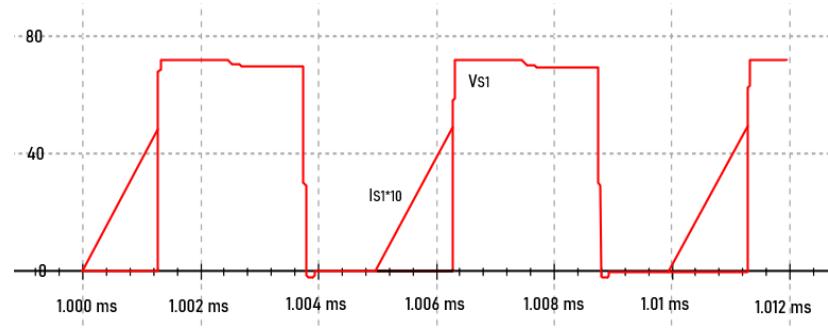


Рисунок 4.29в – Напряжение и ток на переключателе S1

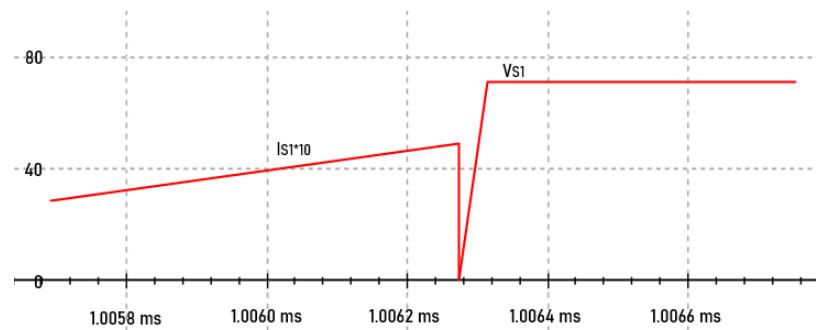


Рисунок 4.29г – Коммутация на переключателе S1.

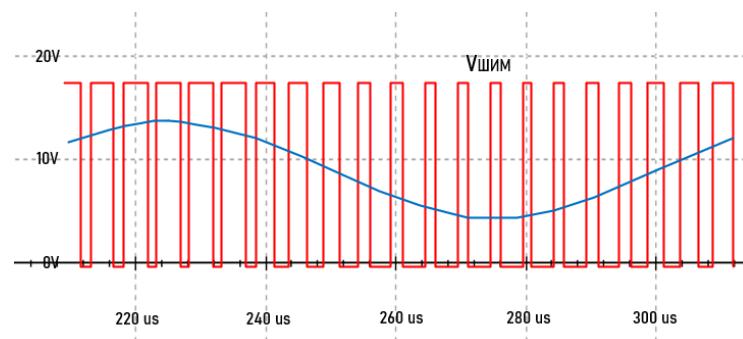


Рисунок 4.29д – Входное напряжение 10 кГц и сигнал ШИМ.

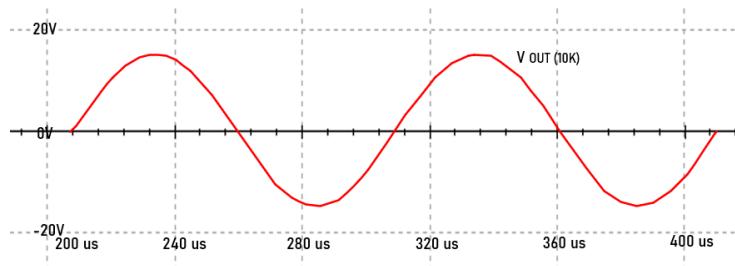


Рисунок 4.29е – Выходное напряжение.

Результаты моделирования продемонстрировали, что реализованный ключевой усилитель (класса D) имеет удовлетворительную частотную характеристику в диапазоне звуковых частот (20 Гц – 20 кГц). Правильная настройка выходного фильтра является ключевым фактором для устранения помех при переключении и поддержания характеристик входного сигнала. Введение коммутации ZVS в структуру полумостового усилителя путем включения резонансного конденсатора было успешно достигнуто, но для данной структуры это привело к увеличению «реактивной» или циркулирующей энергии внутри структуры, что является одним из факторов, ответственных за снижение эффективности по сравнению с другими системами в усилителях мощности, использующими мягкую коммутацию. Тем не менее, реализованный ключевой усилитель потребляет меньше энергии, чем традиционный усилитель при нулевой выходной мощности.

Предложенная методология обеспечивает сбалансированный подход с высокой точностью и эффективностью, но требует значительных временных затрат на начальном этапе. Методология «Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter» [133] предлагает практический подход, что снижает время расчетов, но требует дополнительных симуляций и обладает меньшей точностью. Методологии «Accurate Design of High Efficiency LLC Resonant Converter With Wide Output Voltage» [134] и «Optimal Design of a High Efficiency LLC Resonant Converter with a Narrow Frequency Range for Voltage Regulation» [135] обеспечивают самую высокую точность за счет детализированного подхода, но требуют больше времени и ресурсов.

Разработанная методология расчета резонансного контура и пиковых значений тока в силовых полупроводниковых ключах позволяет упростить задачу разработки энергоэффективного усилителя класса Д уже на стадии проектирования и уменьшить коммутационные помехи в разрабатываемом усилителе. Предложенная методика позволяет значительно (на 10–15%) сократить время расчетов по сравнению с другими методиками за счет структурированного пошагового подхода и использования нормализованных кривых. При этом достигается высокая точность расчетов, которая может быть в пределах $\pm 5\%$, что достаточно для большинства практических приложений.

4.5 Рекомендации по практическому применению результатов

На основе полученных в диссертации результатов с целью обеспечения электромагнитной совместимости в киноконцертном комплексе разработаны следующие рекомендации.

В качестве наглядной методологии, разработаны алгоритмы (рисунок 4.30, рисунок 4.31), где поэтапно представлена процедура организации работ по обеспечению ЭМС.

На рисунке 4.30 представлен рекомендованный алгоритм организации работ по обеспечению ЭМС на реконструируемом объекте.



Рисунок 4.30 – Алгоритм организации работ по обеспечению ЭМС на объекте, подлежащем реконструкции

Рекомендованный алгоритм организации работ по обеспечению ЭМС на новом строящемся объекте показан на рисунке 4.31.



Рисунок 4.31 – Алгоритм организации работ по обеспечению ЭМС на новом строящемся объекте

Используемая в составе киноконцертного комплекса аппаратура должна иметь обязательную сертификацию в соответствии со стандартами в области ЭМС. Однако, как показано в разделе 1, соблюдение действующих норм не гарантирует условий обеспечения ЭМС, поскольку пороговые уровни чувствительности современной информационной, звукотехнической и другой радиоэлектронной аппаратуры значительно ниже допустимых стандартных уровней помех. В связи с этим необходимо принимать дополнительные меры для защиты оборудования и обеспечения надёжной работы комплекса.

Поскольку проблема обеспечения ЭМС технических средств в киноконцертном комплексе охватывает широкий спектр оборудования. Достоверное знание уровней и пространственного распределения электромагнитных полей от разных блоков – необходимое условие качественного и безопасного функционирования и эксплуатации оборудования. Поэтому на начальном этапе необходим предварительный анализ ЭМО объекта. Отличие в представленных алгоритмах на начальном этапе заключается в том, что для реконструируемых объектов дополнительно могут потребоваться прямые измерения (*in situ*) ЭМО реального объекта, тогда как для новых объектов можно ограничиться расчетными методами или методами имитационного моделирования. Для оценки ЭМО разработана программа EMC Suite, листинг которой представлен в Приложении А. В частности, предложенная программа позволяет оптимизировать размещение источников и рецепторов ЭМП, минимизируя их взаимное влияние, а также предоставляет возможность мониторинга ЭМО при добавлении нового оборудования или реконфигурации существующего.

Для корректного анализа процессов, связанных с определением условий обеспечения ЭМС на объекте, проектировщику рекомендуется составить матрицу источников и рецепторов помех исследуемого объекта. Пример оформления данной матрицы представлен в таблице 1.1.

Разумеется, оценка ЭМО не является самоцелью. По ее результатам разрабатываются и осуществляются корректирующие мероприятия и

внедряются технические средства для обеспечения ЭМС. В зависимости от результатов обследования, они могут включать следующее.

1. Рациональная реализация заземляющего устройства, включая:

- приведение систем заземления и выравнивания потенциалов в зданиях и помещениях киноконцертного комплекса в соответствие с требованиями;
- разделение заземляющих проводников для информационной техники и устройств, способных создавать значительные помехи;
- установку вертикальных заземлителей для устройств грозозащиты, разрядников и ограничителей перенапряжения;
- обеспечение растекания тока молнии на безопасном расстоянии от цепей питания и чувствительных цепей, а также мест расположения аппаратуры;
- восстановление поврежденных и прокладку недостающих заземляющих электродов;
- разрыв ненужных связей (например, между элементами грозозащиты и фильтрами присоединения ВЧ-связи, кабельными каналами и т.п.).

2. Пространственное разнесение источников и рецепторов ЭМП и корректная прокладка цепей с учетом условий обеспечения ЭМС:

- зональная планировка;
- раздельная прокладка информационных и силовых цепей;
- оптимизация размещения оборудования;
- организация экранирования (с двух- или односторонним заземлением экранов в зависимости от условий на объекте);
- применение информационных кабелей с высокой степенью симметрии («витая пара»);
- прокладка трасс кабелей в обход областей с высокими уровнями электромагнитных полей;
- применение барьерных заземлителей, шин выравнивания потенциала и Т.Д.;
- использование (там, где это оправдано) оптической развязки.

Эффективным способом минимизации ЭМП, не требующим дополнительных экономических затрат, является увеличение расстояния между источниками и рецепторами помех. Следует по возможности, размещать источники помех (силовые линии, устройства с высоким уровнем ЭМИ) на максимальном удалении от чувствительного оборудования. Для обеспечения эффективного пространственного разнесения источников и рецепторов ЭМП, особенно в условиях их высокой концентрации, можно использовать эмпирические выражения, которые приведены в [136].

Проектировщику следует разработать план зонирования помещений, учитывающий ЭМС. Например, выделить благоприятные зоны для размещения чувствительного оборудования вдали от источников ЭМП.

Кабельные трассы в киноконцертном зале должны быть спроектированы таким образом, чтобы минимизировать пересечения с источниками ЭМП. Наиболее эффективным решением является прокладка кабелей вдоль стен и потолков, максимально удаленных от силовых линий и устройств, генерирующих помехи.

Для снижения уровня помех рекомендуется применять экранирование как для источников, так и для рецепторов ЭМП. Металлические корпуса устройств, воспринимающих ЭМП, должны быть заземлены и иметь достаточную экранирующую способность. При необходимости следует устанавливать дополнительные экраны на источники помех, чтобы ограничить их воздействие на окружающее оборудование. Это особенно важно в случае, когда расстояние между источником и рецептором ограничено конструктивными особенностями помещения. В [137] предложен вычислительный алгоритм, реализованный в среде MATLAB (Приложение В), который на основании анализа электромагнитных и физических параметров материалов позволяет определить показатели их эффективности по экранированию электромагнитных полей в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. В зависимости от параметров ЭМПоля могут быть рекомендованы четыре варианта отечественных материалов: два ферромагнитных металлических сплава с высокой магнитной проницаемостью

(79НМ и 50Н), аморфный сплав (АМАГ–170) и один проводник (медь марки М00К).

Кабели, особенно неэкранированные, подвержены значительному воздействию ЭМП, поэтому важно минимизировать их длину. Если полное экранирование кабелей невозможно, рекомендуется применять частичное экранирование, особенно в зонах, где кабели проходят рядом с источниками помех. Особенности размещения и прокладки структурированных кабельных систем с точки зрения электромагнитной совместимости представлены в работе соискателя [138].

Важным фактором снижения уровня помех является использование соединительных элементов (разъемов, распределительных коробок) с высокой степенью защиты от электромагнитного воздействия. Такие элементы должны быть выполнены из материалов с хорошими экранирующими свойствами и иметь надежное заземление.

3. Модернизация систем электропитания:

- установка стабилизаторов, разделительных трансформаторов и устройств резервирования питания;
- использование источников бесперебойного питания, выпрямителей с низким уровнем помех;
- разделение цепей заземления и зануления (переход с системы TN-C на системы TN-S и TN-C-S);
- уменьшение токов утечки [139].

Системы электропитания и заземления киноконцертного комплекса должны разрабатываться с учетом минимизации потенциального воздействия ЭМП. При проектировании важно руководствоваться современной нормативной базой в области ЭМС, которая предусматривает требуемые уровни ослабления ЭМП.

4. Применение разработанного аппаратно-программного комплекса проектирования помехоподавляющих фильтров.

Разработанная программа (Приложение Б) позволяет точно определить подходящие параметры фильтра из библиотеки под специфические условия эксплуатации. При установке помехоподавляющего фильтра важно определить ключевые узлы системы, где ЭМП могут существенно влиять на работу оборудования (усилители мощности звуковой частоты, звуковые процессоры, микрофонные предусилители и пр.), и установить помехоподавляющие фильтры на данных участках для минимизации уровней излучаемых помех.

Для поддержания эффективности работы помехоподавляющих фильтров необходимо проведение плановых проверок, регулярное обслуживание и корректировка настроек при изменении конфигурации оборудования комплекса.

5. Методология расчета резонансного контура и пиковых значений тока в силовых полупроводниковых ключах.

Данная методология расчета больше предназначена для разработчиков электронной звукотехнической аппаратуры. Разработанная методология расчета применяется для оптимизации резонансных контуров в силовых полупроводниковых ключах, чтобы минимизировать пиковые значения тока и снизить тепловые потери. Предложенные точные модели используются для прогнозирования переходных процессов в силовых ключах, что позволяет более точно определить рабочие параметры и повысить надежность системы.

Приведенными рекомендациями не исчерпывается всё разнообразие решений, направленных на снижение уровня ЭМП, действующих на аппаратуру. Помимо перечисленных корректирующих мероприятий и технических решений борьбы с электромагнитными помехами, в конкретной ситуации может потребоваться применение разделительных трансформаторов, стабилизаторов, средств борьбы со статикой и пр.

Следуя данным практическим рекомендациям, можно значительно снизить уровень ЭМП в киноконцертных залах, что обеспечит стабильную работу электрооборудования и улучшит общие технические характеристики комплекса. Однако, следует отметить, что специфика киноконцертных объектов,

такова, что уровень воздействующих на аппаратуру помех не может быть снижен до очень малых значений без больших затрат.

Обязательным условием после внесенных корректирующих мероприятий и реализации проекта является мониторинг ЭМО для подтверждения условий обеспечения ЭМС, что учтено в представленных алгоритмах (рисунок 4.30, рисунок 4.31).

Регулярный мониторинг уровня ЭМП является также важной частью при эксплуатации или модернизации объекта. Рекомендуется регулярно проводить измерения и анализ показателей ЭМП для выявления ухудшения ЭМО и принятия оперативных мер по устранению выявленных недостатков.

Предложенные рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости успешно апробированы и внедрены (Приложение Г):

– в производственной деятельности ООО «ТехЛаб» при реконструкции кинотеатра «КиноМир» г. Шахтёрск, выполненной ООО «ТехЛаб» (акт внедрения от 31.07.2023 г., утвержденный дирекцией предприятия ООО «ТехЛаб»);

– в производственной деятельности ООО «ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ» при проектировании и техническом оснащении культурно-зрелищных объектов, выполненных предприятием (акт внедрения №4 от 23.04.2024 г., утвержденный генеральным директором предприятия ООО «ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ»).

4.6 Выводы

1. Разработан алгоритм анализа помех от источников вторичного электропитания в кондуктивных цепях. Результаты анализа позволяют прогнозировать возможные помехи в кондуктивных цепях на начальной стадии проектирования, а также анализировать уже существующую систему на соответствие допустимым нормам.

2. В соответствии с предложенными алгоритмами разработано программное обеспечение для автоматизации анализа ЭМО, реализованное с использованием среды Borland C++ Builder 6 на языке программирования C++. Программа обеспечивает проведение анализа ЭМО, создаваемой источниками питания кинотехнологического и радиоэлектронного оборудования в кондуктивной среде, на наличие помех, превышающих допустимые уровни, и позволяет сформулировать требования к помехоподавляющим средствам, обеспечивающим электромагнитную совместимость источников питания с энергетической сетью и электронной аппаратурой.

3. Создана база данных помехоподавляющих фильтров для программы анализа ЭМО в кондуктивной среде. По результатам анализа программа производит выбор фильтра, соответствующего требованиям к помехоподавляющим средствам.

4. Разработанное программное обеспечение может применяться не только при анализе электромагнитных помех, создаваемых импульсными источниками питания, но и для решения более широкого спектра задач в области электромагнитной совместимости.

5. Представлены результаты аналитического исследования резонансного полумостового усилителя мощности звуковой частоты. Получены временные диаграммы, описывающие поведение усилителя на разных этапах его работы, а также нормализованные кривые, служащие основой для методологии проектирования импульсного усилителя с минимальными коммутационными

помехами. Предложена методика расчета значений резонансного контура и пиковых токов в силовых полупроводниковых ключах.

7. На основании полученных данных об электромагнитной обстановке предложены средства и мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости в киноконцертном комплексе, разработаны практические рекомендации по обеспечению ЭМС в культурно-зрелищных объектах.

8. Предложен вычислительный алгоритм, реализованный в среде MATLAB, который на основании анализа электромагнитных и физических параметров материалов позволяет определить показатели их эффективности по экранированию электромагнитных полей в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. Исследовано четыре варианта отечественных материалов: два ферромагнитных металлических сплава с высокой магнитной проницаемостью (79НМ и 50Н), аморфный сплав (АМАГ–170) и один проводник (медь марки М00К).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обобщение и получено новое решение актуальной научно-технической задачи развития методов и средств обеспечения электромагнитной совместимости оборудования в культурно-зрелищных объектах путем обоснования рациональных параметров аппаратуры за счет применения математического моделирования процессов и разработки программного комплекса, что позволяет усовершенствовать методику проектирования и оснащения сложных функционально-насыщенных помещений.

Результаты диссертационного исследования могут быть сформулированы следующим образом.

1. Обоснована математическая модель радиосвязи ITU-R P.1238, разработаны реализующие её алгоритм и программный модуль для оценивания электромагнитной обстановки внутри помещения. Расхождение результатов расчета с экспериментальными данными находится в пределах от 2% до 15%.

2. Разработаны алгоритм и программный модуль для решения задачи выбора противопомехового фильтра звукотехнического оборудования.

3. Впервые сформированы математические модели процессов и проведен анализ электромагнитной обстановки в локализованном объеме с учетом эмиссии от кинотехнологического оборудования в окружающее пространство, что позволяет выполнять прогнозирование электромагнитных параметров, обеспечивающих выполнение регламентных требований, на стадии проектирования комплекса.

4. Получили дальнейшее развитие методика и алгоритмы комплексного анализа электромагнитного поля применительно к исследованию электромагнитной обстановки в помещениях аппаратной киноконцертного комплекса с учетом вариации параметров размещенных источников и рецепторов.

5. Впервые показано, что источниками низкочастотных электромагнитных помех могут быть металлические элементы радиоэлектронной аппаратуры, создающие механические колебания при постоянном или низкочастотном магнитном поле, и рассмотрены способы устранения их отрицательного влияния.

6. Даны оценка числовых значений напряженности эмиттируемого за счет колебаний ферромагнитного диска низкочастотного магнитного поля и показано, что источник может создавать сигналы помех от десятков нановольт до единиц микровольт.

7. Получены новые результаты анализа электромагнитной обстановки в реальном помещении аппаратного киноконцертного комплекса, которые могут быть использованы при проектировании новых или реконструкции существующих киноконцертных комплексов.

8. Полученные в диссертации результаты анализа и разработанные методики обеспечивают основу для создания комплекса мероприятий по формированию благоприятной электромагнитной обстановки при решении задач электромагнитной и информационной безопасности на этапе проектирования.

9. Разработанные модели и методики электродинамического анализа источников в помещении обеспечили методическую базу для создания основы замкнутой автоматизированной системы анализа электромагнитной обстановки в помещениях.

10. Показано, что разработанная методология расчета резонансного контура и пиковых значений тока в силовых полупроводниковых ключах позволяет упростить задачу разработки энергоэффективного усилителя класса Д уже на стадии проектирования и уменьшить коммутационные помехи в разрабатываемом усилителе.

11. Разработаны программы для анализа помех, создаваемых источниками вторичного электропитания кинотехнологического и звукотехнического оборудования в кондуктивной среде с целью представления рекомендаций для

рационального выбора помехоподавляющих фильтров, обеспечивающих электромагнитную совместимость источников электропитания с энергетической сетью и электронной аппаратурой.

12. Результаты исследований внедрены в производственную деятельность ООО "ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ" (акт внедрения №4 от 23.04.2024 г., утвержденный генеральным директором предприятия) и ООО "ТехЛаб" (акт внедрения от 31.07.2023 г., утвержденный дирекцией предприятия), а также в учебный процесс ГБПОУ ДНР «ШКК И ТВ ИМ. А.А. ХАНЖОНКОВА» при подготовке по специальностям 11.02.05 «Аудиовизуальная техника» и 55.02.01 «Театральная и аудиовизуальная техника (по видам)» (акт № 725/1 от 02.12.2024 г., утвержденный директором образовательного учреждения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общество инженеров-акустиков (AES) : сайт. – URL: <https://https://aes2.org/standards> (дата обращения: 14.06.2024).
2. Векслер, Г.С. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г. С. Векслер, В. С. Недочетов, В. В. Пилинский – К.: Техника, 1990. – 167 с. – ISBN 5-335-00575-0. – Текст : непосредственный.
3. Пилинский, В. В. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 1 – Основные регламентирующие документы / В. В. Пилинский, А. М. Прядко, М. В. Родионова, А. С. Чупахин, В. Б. Швайченко // Техническая электродинамика. – Тематический выпуск «Проблемы современной электротехники», – 2008. – № 6. – С. 115-120. – Текст : непосредственный.
4. Пилинский, В.В. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 2 – Формирование электромагнитной обстановки силовыми цепями киноконцертного оборудования / В.В. Пилинский, М.В. Родионова, А.С. Чупахин // Техническая электродинамика. – Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность», 2009. – № 4. – С. 3–8. – Текст : непосредственный.
5. Пилинский, В.В. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 3. Расчет электромагнитных полей в функционально насыщенном помещении / В.В. Пилинский, В.Б. Швайченко, А.С. Чупахин // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2012. – № 1. – С. 135–140. – Текст : непосредственный.
6. Оникиенко, Ю. А. Анализ влияния параметров источника питания и входного сигнала на уровень кондуктивных помех усилителя класса D / Ю. А. Оникиенко, В. В. Пилинский, В. Б. Швайченко // Техническая электродинамика. Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность». – 2012. – № 1 – С.70–74. – Текст : непосредственный.

7. Pilinsky, V. Assessment of Electromagnetic Environment Mains occurring by SMPS & PLC Systems / V. Pilinsky, A. Rozvadovsky, I. Zaitcev // EMC Europe 2012 : proceedings of the 11-th Int. Symp. on EMC (17–21 Sept. 2012, Rome, Italy). – 2012. – p. 8–6. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6396780> (дата обращения: 15.12.2024). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. DOI: 10.1109/EMCEurope.2012.6396780

8. Пилинский, В.В. Моделирование электромагнитной обстановки в помещении аппаратной киноконцертного комплекса / В. В. Пилинский, Р. А. Сирота // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. – №.51(1160) – С. 83–86

9. Ott H. W. Electromagnetic Compatibility Engineering / H. W. Ott New York: Wiley, 2009. – 872 p.

10. Armstrong, K. AES-X13 and interference-free pro-audio systems / K. Armstrong, T. Waldron // EMC 2002 : IEEE International Symposium., Sorrento, Italy, (19–23 August 2002, Minneapolis, USA). – 2002. – Vol. 1. – P. 434 – 439. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/1032518> (дата обращения: 14.06.2024). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. DOI: 10.1109/ISEMC.2002.1032518

11. Павлыш, В.Н. Применение математического моделирования к исследованию влияния электромагнитных полей на зрителей, присутствующих в киноконцертных комплексах / В.Н. Павлыш, А.И Дегонский, А.С.Чупахин // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XXIX междунар. науч.-техн. конф., (12-18 сентября 2022 г.), г. Севастополь – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2022. – С. 235-238.

12. Petrishev, O. Electroacoustic Effects as Motive of Power Electronics Units EMI Generation / V. Pilinsky, M. Rodionova, V. Shvaichenko // EMC-2008 : proceeding 19th International Wroclaw Symposium & Exhibition on Electromagnetic Compatibility (11–13 June 2008, Wroclaw). – Wroclaw, 2008. – p. 405 – 410.

13. IEC 60533: 1999. Electrical and electronic installations in ships – Electromagnetic compatibility / Geneva: International Electrotechnical Commission, 1999. – 49 p. ISBN 2831849993.

14. Пилинский, В. В. Методика прогнозирования электромагнитных помех на основе косвенного критерия / В. В. Пилинский, М. В. Родионова, А. И. Рыбин // Труды X международного Вроцлавского симпозиума по ЭМС (Вроцлав, Польша). – 1990. – Ч.1. – С. 425–430.

15. SMPS Interferences: Prediction and Suppression / Pilinsky V. V., Rodionova M. V., Shvaichenko V. B., Temnikov V. A. // International conference on electrical drives and power electronics rec. (Kosice, Slovak Republic). – 1996. – V.2. – p. 479–483.

16. Нормы 1–72 - 9–72. Общесоюзные нормы допускаемых индустриальных радиопомех [Текст]: Утв. 12/VI 1972 г. / Гос. комис. по радиочастотам СССР. – Москва : Связь, 1973. – 73 с. : черт.; 21 см. . — Текст: непосредственный.

17. Directive 2014/30/EU of 26 February 2014 on the harmonization of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility – URL: <https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/electromagnetic-compatibility> (дата обращения: 14.06.2024).

18. ГОСТ EN 55103-1-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитные помехи от профессиональной аудио-, видео-, аудиовизуальной аппаратуры и аппаратуры управления световыми приборами для зрелищных мероприятий. Нормы и методы измерений = Electromagnetic compatibility - Product family standard for audio, video, audio-visual and entertainment lighting control apparatus for professional use – Part 1: Emissions: межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1792-ст: введен впервые: дата введения 2015-01-01 / разработан Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – Москва : Стандартинформ, 2013. – 52 с. – Текст: непосредственный.

19. ГОСТ EN 55103-2-2016. Электромагнитная совместимость. Стандарт на группу однородной продукции для профессиональной аудио-, видео-, аудиовизуальной аппаратуры и аппаратуры управления световыми приборами для зрелищных мероприятий. Часть 2. Устойчивость к электромагнитным помехам = Electromagnetic compatibility – Product family standard for audio, video, audio-visual and entertainment lighting control apparatus for professional use – Part 2: Immunity: межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 декабря 2016 г. № 1927-ст: введен впервые: дата введения 2017-09-01 /подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2016, 56 с. ; 29 см. – Текст: непосредственный.

20. ГОСТ 32136-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам профессиональной аудио-, видео-, аудиовизуальной аппаратуры и аппаратуры управления световыми приборами для зрелищных мероприятий. Требования и методы испытаний = Electromagnetic compatibility – Product family standard for audio, video, audio-visual and entertainment lighting control apparatus for professional use – Part 2: Immunity: межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 396-ст: введен впервые: дата введения 2014-01-01 /подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 16 с. ; 29 см. – Текст: непосредственный.

21. ГОСТ 30805.22-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Радиопомехи индустриальные. Нормы и методы измерений = Information technology

equipment— Radio disturbance characteristics— Limits and methods of measurement : межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 415-ст: введен впервые: дата введения 2014-01-01 /подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 59 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

22. ГОСТ CISPR 24-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Устойчивость к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний = Information technology equipment – Immunity characteristics – Limits and methods of measurement: межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 октября 2013 г. № 1268-ст: введен впервые: дата введения 2014-07-01 /подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 34 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

23. ГОСТ CISPR 32-2015. Электромагнитная совместимость оборудования мультимедиа. Требования к электромагнитной эмиссии = Electromagnetic compatibility of multimedia equipment – Emission requirements : межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 августа 2015 г. № 1194-ст: введен впервые: дата введения 2016-07-01 /подготовлен Санкт-Петербургским филиалом «Ленинградское отделение Научно-исследовательского института радио» (Филиал ФГУП НИИР-ЛОНИИР) и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 73 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

24. ГОСТ CISPR 35-2019. Электромагнитная совместимость технических средств, предназначенных для использования внутри зданий : межгосударственный НД : утвержден и введен в действие Приказом Евразийского совета по стандартизации, метрологии и сертификации от 29 марта 2017 г. № 127-ст: введен впервые: дата введения 2023-12-01 / - Минск.: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2019. - 86 с. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/554545263> (дата обращения: 04.06.2024).

25. ГОСТ 30805.13-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиовещательные приемники. Телевизоры и другая бытовая радиоэлектронная аппаратура. Радиопомехи индустриальные. Нормы и методы измерений = Sound and television broadcast receivers and associated equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement: межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 414-ст: введен впервые: дата введения 2014-01-01 / подготовлен Санкт-Петербургским филиалом «Ленинградское отделение Научно-исследовательского института радио» (Филиал ФГУП НИИР-ЛОНИИР) и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 30 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

26. ГОСТ Р 51318.20-2012. Совместимость технических средств электромагнитная. Приемники звукового и телевизионного вещания и связанное с ними оборудование. Характеристики помехоустойчивости. Нормы и методы измерений= Sound and television broadcast receivers and associated equipment – Immunity characteristics – Limits and methods of measurement: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 ноября 2012 г. № 861-ст: введен впервые: дата введения 2013-01-01 / подготовлен Техническим комитетом по стандартизации ТК 30

«Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 65 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

27. ГОСТ CISPR 15-2014. Нормы и методы измерения характеристик радиопомех от электрического осветительного и аналогичного оборудования = Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment : межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 ноября 2014 г. № 1709-ст: введен впервые: дата введения 2015-03-01 / подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 50 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

28. ГОСТ Р 51514-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость светового оборудования общего назначения к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний= Information technology equipment — Radio disturbance characteristics— Limits and methods of measurement : межгосударственный стандарт : издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 октября 2013 г. № 1134-ст: введен впервые: дата введения 2014-01-01 / подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2014, 12 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

29. ГОСТ Р МЭК 62040-1-1-2009. Источники бесперебойного питания (ИБП). Часть 1-1. Общие требования и требования безопасности для ИБП, используемых в зонах доступа оператора = Uninterruptible power systems (UPS) - Part 1-1: General and safety requirements for UPS used in operator access areas : национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное:

утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 943-ст: введен впервые: дата введения 2011-01-01 /подготовлен ГОУВПО МЭИ (ТУ). — Москва: Стандартинформ, 2011, 31 с.; 29 см. — Текст: непосредственный.

30. ГОСТ EN 301 489-1 V1.9.2-2015. Электромагнитная совместимость и радиочастотный спектр. Электромагнитная совместимость технических средств радиосвязи. Часть 1. Общие технические требования = Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 1: Common technical requirements : межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 августа 2015 г. № 1196-ст: введен впервые: дата введения 2016-07-01 /подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2016, 38 с.; 29 см. — Текст: непосредственный.

31. ГОСТ Р 52459.17-2009. Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства радиосвязи. Часть 17. Частные требования к оборудованию широкополосных систем передачи в диапазоне 2,4 ГГц, высокоскоростных локальных сетей в диапазоне 5 ГГц и широкополосных систем передачи данных в диапазоне 5,8 ГГц = Electromagnetic compatibility and radio spectrum Matters (ERM); ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment; Part 17: Specific conditions for 2,4 GHz wideband transmission systems, 5 GHz high performance RLAN equipment and 5,8 GHz Broadband Data Transmitting Systems: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 сентября 2009 г. № 340-ст: введен впервые: дата введения 2010-01-01 /подготовлен ФГУП ЛОНИИР и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная

совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 12 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

32. ГОСТ IEC 61000-6-3-2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 6-3. Общие стандарты. Стандарт электромагнитной эмиссии для жилых, коммерческих и легких промышленных обстановок = Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-3: Generic standards - Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 декабря 2016 г. № 1911-ст: введен впервые: дата введения 2017-09-01 /подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 14 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

33. ГОСТ IEC 61000-6-4-2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 6-4. Общие стандарты. Стандарт электромагнитной эмиссии для промышленных обстановок = Electromagnetic compatibility (EMC). Part 6-4. Generic standards. Emission standard for industrial environments. : межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 декабря 2016 г. № 1912-ст: введен впервые: дата введения 2017-09-01 /подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 12 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

34. ГОСТ 30804.6.1-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением. Требования и методы испытаний = Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-1: Generic standards - Immunity for

residential, commercial and light-industrial environments : межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 424-ст: введен впервые: дата введения 2014-01-01 /подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 10 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

35. ГОСТ 30804.6.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в промышленных зонах. Требования и методы испытаний = Electromagnetic compatibility (EMC) -Part 6-2: Generic standards - Immunity for industrial environments : межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 427-ст: введен впервые: дата введения 2014-01-01 /подготовлен Закрытым акционерным обществом «Научно-испытательный центр «САМТЭС» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». — Москва: Стандартинформ, 2020, 10 с. ; 29 см. — Текст: непосредственный.

36. Анализ допустимых регламентированных уровней эмиссии и чувствительности оборудования киноконцертного комплекса / В.В. Пилинский, А.С. Чупахин, В.Б. Швайченко, А.А. Довженко // Технологии ЭМС. – 2015. – № 3(54) – С.18–25.

37. Безладнов, Н. Л. Проектирование транзисторных усилителей звуковых частот / Н. Л. Безладнов, Б. Я. Герценштейн, В. К. Кожанов. – М.: Связь, 1978. – 368 с.

38. BS EN 55103-2:2009. Electromagnetic compatibility. Product family standard for audio, video, audio-visual and entertainment lighting control apparatus for

professional use. Emissions. – Intr. 2009–09–30. – L. : BSI, 2009, 40 p. : ISBN 978 0 580 75850 8

39. BS EN 55013:2013. Sound and television broadcast receivers and associated equipment. Radio disturbance characteristics. Limits and methods of measurement. – Intr. 2013–08–31. – L. : BSI, 2013, 48 p.

40. BS EN 55022:2010. Information technology equipment. Radio disturbance characteristics. Limits and methods of measurement. – Intr. 2011–07–31. – L. : BSI, 2011, 90 p.

41. Petrishev, O. The method of determining the level of low-frequency interference induced by ferromagnetic component on the circuit board / O. Petrishev, V. Pilinsky, A. Chupakhin. // Proc. of the 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo), St.Petersburg, Russia, 4–8 July 2017. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7998107>. – DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998107 (дата обращения: 15.12.2024).

42. Петрищев, О.Н. О природе источников электромагнитных помех звукового частотного диапазона / О.Н. Петрищев, В.В. Пилинский // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2016. – Т.59, №10. – С. 47–59. – ISSN 2307-6011 (Online), ISSN 0021-3470. – DOI: <https://doi.org/10.20535/S002134701610006X>.

43. Ferromagnetic disc as a source of interference audio frequency range / O. Petrishev, V. Pilinsky, V. Savchuk // Вестник НТУ «ХПИ» Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 15 (1237). – С.111–116.

44. Петрищев, О. Н. Особенности расчета переменного магнитного поля, создаваемого вибрирующим ферромагнитным диском / О. Н. Петрищев, В. В. Пилинский // Вестник НТУ «ХПИ» Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ»., 2016. – №.14 (1186) – С. 78–81

45. Петрищев, О.Н. Кондуктивные помехи, обусловленные низкочастотными вибрациями / О.Н. Петрищев, В.В. Пилинский // IV Всеукраинская научно-техническая конференция «Практические аспекты

совместимости электромагнитной и молниезащиты 2016» (18 – 20 октября 2016 г.) – Харьков: Изд-во ХТУ «ХПИ», 2014. – С. 45.

46. Walravens, C. Efficient Reduction of Electromagnetic Interference Effects in Operational Amplifiers / C. Walravens, S. Van Winckel, J. – M. Redouté, M. Steyaert // IET Electronics Letters. – Jan. 2007. – Vol. 43, №. 2. – P. 84 – 85. DOI:10.1049/el:20073026.

47. Richelli, A. Design of a Folded Cascode Opamp with Increased Immunity to Conducted Electromagnetic Interference in 0.18um CMOS / A. Richelli, G. Matigia, J.M. Redouté // Elsevier Microelectronics Reliability. – Mar. 2015. – Vol. 55, № 3–4. – P. 654–661. DOI:10.1016/j.microrel.2014.12.019.

48. Elliott, C. Reducing Electromagnetic Interference (EMI) With Low Voltage Differential Signaling (LVDS) Application Report SLLA030C // Texas Instruments Incorporated. URL: <http://www.ti.com/lit/an/slla030c/slla030c.pdf>. (дата обращения: 17.09.2024).

49. Особенности измерения вибрации электродвигателей виброметрами K1 и Vibro Vision. URL: <https://electricalschool.info/main/naladka/270-izmerenie-vibracii-jelektrodvigatelejj.html> (дата обращения: 17.09.2024).

50. Смирнов, В. И. Курс высшей математики, том III, часть I. / В. И. Смирнов. – М.: Наука, 1974. – 324 с.

51. Тихонов, А.Н. Математическая модель. – в кн. Математическая энциклопедия, т.3 / А.Н. Тихонов. – М.: Советская энциклопедия, 1982. – С. 574 – 575.

52. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 873 с.

53. Hutson, A. R. Elastic Wave Propagation in Piezoelectric Semiconductors / A. R. Hutson, D. L. White // J. Appl. Phys. – 1962. – № 33. – P. 40 – 47.

54. Такер, Дж., Рэмптон, В. Гиперзвук в физике твердого тела : пер. с англ. / под ред. И.Г. Михайлов, В.А. Шутилов. – Москва: Мир, 1975. – 453 с.: ил.

55. Жарий, О. Ю. К вопросу об оценке магнитных эффектов, сопровождающих распространение плоских волн в пьезокерамической среде / О. Ю. Жарий // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1978. – №8. – С. 705-709.
56. Петрищев, О. Н. Магнитные волны в поляризованных поликристаллических магнитострикционных материалах / О. Н. Петрищев // Вестник Киевского политехн. ин-та. Электроакустика и звукотехника. – 1990. – Вып. 14. – С. 23–35.
57. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовица. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
58. Cantieni, R. Office floor vibrations: modal parameter identification and vibration monitoring / R. Cantieni, T. Biro // URL: http://seismicsystems.net/downloads/2005_Cantieni_Biro_Modal_Parameter_Identification_and_Vibration_Monitoring_Mainau.pdf (дата обращения: 29.06.2024)
59. Доннел, Л. Г. Балки, пластины и оболочки / Л. Г. Доннел. – М.: Наука, 1982. – 567 с.
60. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
61. Петрищев, О.Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Часть 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса – антирезонанса / О.Н. Петрищев. – Киев: Аверс, 2012. – 300 с.
62. Власов, К. Б. Некоторые вопросы теории упругих ферромагнитных (магнитострикционных) сред / Изв. АН СССР. Сер. физическая. – 1957. – Т. 21. – № 8. – С. 1140–1148.
63. Сыркин, Л. Н. Пьезомагнитная керамика. – Л.: Энергия, 1980. – 208 с.
64. Еругин, Н.П. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений / Н.П. Еругин, И.З. Штокало и др. – Киев: Высшая школа, 1974. – 472 с.

65. Кошляков, Н. С. Уравнения в частных производных математической физики. / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов – М.: Высшая школа, 1970. – 710 с.
66. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям [Текст] / Э. Камке ; пер. с нем. С. В. Фомина. – 5-е изд., стер. – Москва : Наука, 1976. – 576 с.; 22 см.
67. Ben Dhia, S. Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits: Techniques for low emission and susceptibility / S. Ben Dhia, M. Ramdani, E. Sicard // Springer Science & Business Media, 2006. – 473 p. – ISBN 978-0-387-26601-5.
68. Montrose, Mark I. Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance: A Handbook for Designers 2nd Edition / Mark I. Montrose. – Wiley-IEEE Press, 2000. – 336 p. – ISBN: 978-0-7803-5376-3.
69. Electrical Engineer's Reference Book / Eds. M. A. Laughton, D.F. Warne. – Oxford, Boston. : Newnes, 2003, – 1504 p.
70. Тамм, И.Е. Основы теории электричества: учеб. Пособие для вузов. – 11-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗИАТЛИТ, 2003. – 616 с. – ISBN 5-9221-0313-X.
71. Титов, Е. В. Повышение безопасности электротехнологий АПК на основе интегрированного контроля электромагнитных излучений : специальность 05.20.02 “Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве” : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Е. В. Титов; Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. – Барнаул, 2013. – 125 с.
72. СанПиН 2.1.2.1002-00. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. — Введ. 2001-07-01. — М., 2001. — 16 с.
73. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. — Введ. 2003-03-24. — М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. — 41 с.

74. СанПиН 2.1.8/2.2.4.2490-09. Электромагнитные поля в производственных условиях. Изменения № 1 к СанПиН 2.2.4.1191-03. — Введ. 2009-05-15. — 2009. — 7 с.
75. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. — Введ. 2003-06-30. — М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003.— 56 с.
76. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. — Введ. 1996-05-08. — М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996. — 30 с.
77. СанПиН 2.2.4/2.1.8.989-00. Изменение N 1 к СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. — Введ. 2001-01-01.— М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2001. — 30 с.
78. МГСН 2.03-97. Допустимые параметры электромагнитных излучений в помещениях жилых и общественных зданий и на селитебных территориях. — Введ. 1997-04-01. — М.: ГУП «НИАЦ», 1997. — 5 с.
79. СН № 2971-84. Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты. — Введ. 1984-02-23. — 8 с.
80. МСанПиН 001-96. Санитарные нормы допустимых уровней физических факторов при применении товаров народного потребления в бытовых условиях.— Введ. 1997-01-01. — М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. — 19 с.
81. Р 2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. — Введ. 2005-11-01. — 2005. — 133 с.

82. СанПиН 2.2.4.1329-03. Требования по защите персонала от воздействия импульсных электромагнитных полей. — Введ. 2003-05-28. — 2003. — 27 с.
83. МУК 4.3.677-97. Определение уровней электромагнитных полей на рабочих местах персонала радиопредприятий, технические средства которых работают в НЧ, СЧ и ВЧ диапазонах. — Введ. 1997-11-06. — М.: Центр санэпиднормирования гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1998. — 10 с.
84. МУК 4.3.679-97. Определение уровней магнитного поля в местах размещения передающих средств радиовещания и радиосвязи кило-, гекто- и де-каметрового диапазонов. — Введ. 1997-11-06. — М.: Центр санэпиднормирования гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1998. — 30 с.
85. МУК 4.3.1167-02. Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц. — Введ. 2002-10-07. — М.: Минздрав России, 2002. — 104 с.
86. Мигалёв, И. Е. Автоматизированный контроль электромагнитных излучений в технологиях АПК : специальность 05.20.02 “Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве” : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мигалёв Иван Евгеньевич; ; Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. – Барнаул, 2018. – 200 с.
87. Кольчугин, Ю. И. Разработка методик расчета, измерений и исследование электромагнитных полей вблизи антенн сотовой подвижной связи : специальность 05.12.07 “Антенны, СВЧ устройства и их технологии” : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара, 1998. – 220 с.

88. Маслов, О.Н. Моделирование волновых полей средств электронно-вычислительной техники / О.Н. Маслов // Радиотехника и электроника.– 1994.– Т.39, №1. – С.6-13.
89. Нефедов, Е.И. Теория интегральных уравнений дифракции электромагнитных волн / Е.И. Нефедов, Ю.Ю. Радциг, С.И. Эминов // ДАН, Т. 345, № 2, 1995. с. 186 – 187.
90. Hayt, W. H. Engineering electromagnetics. – NY, Paris, Tokyo, McGraw-Hill Book Company. 2009. – 527p.
91. Маслов, М. Ю. Численный анализ электромагнитной обстановки в офисном помещении / М. Ю. Маслов // Вестник СОНИИР 2004. – №1–С. 162–168.
92. Антипова, С.Е. Методы прогнозирования электромагнитной обстановки на рабочих местах предприятий электроэнергетики и связи/ С.Е. Антипова, В.А.Романов // Радиотехника. 2001. – № 9. – С. 81–85.
93. ITU-R P.1238-8 Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz. Geneva: ITU-R Recommendations, 2015. – 22p. – URL: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1238-8-201507-S!!PDF-E.pdf (дата обращения: 16.11.2024)
94. Старцев, С.С. Модели распространения сигнала Wi-Fi URL: <http://conf.nsc.ru/files/conferences/MIT-2013/fulltext/146127/151267/Startsev.pdf>. (дата обращения: 16.06.2024)
95. Yuko, M. Outdoor to Indoor Propagation Modeling with The Identification of Path Passing Through Wall Openings / M. Yuko, O.Yasuhiro, T. Tokio // Kanagawa, Japan, IEEE, 2002, pp. 239-8536.
96. Lahteenmaki, J. Indoor Propagation Models / J. Lahteenmaki // COST Action 231: Digital mobile radio towards future generation systems: Final report. 1999. P. 175–179.
97. Johnson, B. Professional Visual Studio 2012 / B. Johnson : New York. Wrox Publ., 2012. 1104 p.

98. Herbert Schildt C# 4.0 The Complete Reference / McGraw Hill Professional, NY: McGraw Hill Professional, 2010, 976 p., ISBN-13: 978-0071741163.

99. Документация на измерительный прибор напряженности ближнего поля NFM 1. – Берлин. – 16 с.

100. Uniwersalny szerokopasmowy mernik natezenia pola elektromagnetycznego, Typ MEH-25. – Politechnika wroclawska: Wroclaw (Poland).

101. Енютин, К.А. Исследование влияния внешних электромагнитных помех на электрооборудование мультисервисных кабельных систем : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Енютин Константин Александрович; Российский государственный университет туризма и сервиса. – Москва, 2009.– 128 с.

102. Силаева, Е.В. Обеспечение электромагнитной совместимости структурированных кабельных систем : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Силаева Елена Владимировна; [Место защиты: ГОУВПО «Московский государственный университет сервиса】.– Черкизово, 2005.– 149 с.

103. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы ПУЭ-7. – М.: Моркнига, 2018. – 512 с., ISBN: 978-5-903089-16-1.

104. ГОСТ Р 50571.4.44-2019. Электроустановки низковольтные. Часть 4.44. Защита для обеспечения безопасности. Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 09 апреля 2019 г. № 126-ст : введен впервые : дата введения 2019-04-09/ подготовлен Ассоциацией «Росэлектромонтаж». – Москва : Стандартинформ, 2019. – 52 с. — Текст : непосредственный.

105. ГОСТ Р 50571.5.54-2013. Электроустановки низковольтные. Часть 5-

54. Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства, защитные проводники и защитные проводники уравнивания потенциалов : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 сентября 2013 г. № 976-ст : введен впервые : дата введения 2015-01-01/ подготовлен Московским институтом энергобезопасности и энергосбережения – Москва : Стандартинформ, 2014. – 27 с. — Текст : непосредственный.

106. ГОСТ Р 50571.22-200. Электроустановки зданий. Часть 7. Требования к специальным электроустановкам. Раздел 707. Заземление оборудования обработки информации : государственный стандарт Российской Федерации : издание официальное : принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 18 декабря 2000 г. № 376-ст : введен впервые : дата введения 2002-01-01/ подготовлен ВИЭСХ и ВНИИМаш. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 98 с. — Текст : непосредственный.

107. IEEE STD 3004.8-2018 IEEE recommended practice for motor protection in industrial and commercial power systems. – New York: IEEE, 2018. – 148 p.

108. Санитарные правила и нормы 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы : официальное издание : утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 03 июня 2003 г. № 118 : введены в действие 30 июня 2003 г. – 39 с. — Текст: непосредственный.

109. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : введен впервые : дата введения 2014-07-01/ разработан ООО «Линвิต» и «Техническим комитетом по стандартизации ТК 30

«Электромагнитная совместимость технических средств

110. ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы = Risk management. Protection against lightning. Part 1. General principles : национальный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2010 г. № 795-ст: введен впервые: дата введения 2011-12-01 /подготовлен АНО «НИЦ КД». — Москва: Стандартинформ, 2011, 46 с.— Текст: непосредственный.

111. Павлыш, В.Н. Задача управления параметрами технических элементов оборудования киноконцертных комплексов / В.Н. Павлыш, А.С. Чупахин // материалы VII Международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях» «СИТОНИ-2021» (Донецк, 23 ноября 2021 г.) – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2021. – С.57–66.

112. AES48-2019: AES standard on interconnections – Grounding and EMC practices – Shields of connectors in audio equipment containing active circuitry. New York: AES. – 2019. – 24 p. – URL: <https://www.aes.org/publications/standards/>. (дата обращения: 15.12.2024)

113. Garcia, M. Shielding Effectiveness of Novel Materials in Audio Equipment / M. Garcia, R. Lopez // Materials Today: Proceedings. 2020. – №31. – 333–339 p.

114. Zhang, He Optimization of Shielding Solutions for Audio Systems. / He Zhang // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. – №67(7). – 5598–5606 p.

115. Гришин, Д. Конструкционные материалы для обеспечения электромагнитной совместимости радиоаппаратуры / Д. Гришин, И. Гусев // Фотоника. – 2023. – Т. 17. № 3. – С. 210–217.

116. Комнатнов, М. Е. Модели и методы вычисления и измерения эффективности экранирования материалов с использованием сдвоенных и коаксиальных ТЕМ-камер / М.Е. Комнатнов // Известия вузов России.

Радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27, № 4. – С. 19–37.

117. 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.

118. ГОСТ 859-2014. Медь. Марки. : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 01 августа 2014 г. № 865-ст : введен впервые : дата введения 2015–07–01/ разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 368 «Медь». – Москва : Стандартинформ, 2015. – 9 с. — Текст : непосредственный.

119. ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки. : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 01 августа 2014 г. № 865-ст : введен впервые : дата введения 1975–01–01/ разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 368 «Медь». – Москва : Изд-во стандартов, 1974. – 18 с. — Текст : непосредственный.

120. ТУ 11-91 Яе0.021.180 ТУ Ленты аморфные из магнитомягких сплавов. Технические условия. – Введ. 1991–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 29 с.

121. Гриимальский, О.В. Моделирование рассеивающих свойств многослойных материалов на основе приближенных двухсторонних граничных условий / О.В. Гриимальский, Р.Я. Низкий // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2024. - № 1 (407). – С. 77–87.

122. Резинкина, М.М. Расчет электромагнитных полей в неоднородных средах для выбора защитных покрытий / М.М.. Резинкина // Электротехника и электромеханика. – 2019. – № 5. – С. 31–34.

123. Standard for floating-point arithmetic, IEEE 754, 2008, p. 58.

124. Титков, Д. В. Аппаратно-программный комплекс проектирования гибридных помехоподавляющих фильтров / Д. В. Титков, А.С. Чупахин, Осман

Шарадга, В. Б. Швайченко // Труды международной МНТК «Силовая электроника и энергоэффективность – 2013». – ISSN 2307-857X Электронное издание. – 3 с.

125. Послед, Б.С. Borland C++ Builder 6. Разработка приложений баз данных / Б.С. Послед // Санкт-Петербург: ООО «ДиаСофтЮП», 2003. – 320 с.

126. EMI-RFI Filters Arcotronics 2000. – p. 64.

127. Линейка импульсных усилителей звука GXD // Сайт производителя звукотехники QSC. URL: <https://www.qsc.com/solutions-products/power-amplifiers/portable/2-channel/gxd-series/>. (дата обращения: 07.12.2024).

128. Использование технологии Drive Core в усилителях звука: // Сайт производителя звукотехники Crown. URL: https://www.crownaudio.com/en/product_families/drivecore-install-da-series. (дата обращения: 07.11.2021).

129. CISPR 25 Ed. 4.0b: 2016. Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices – Limits and methods of measurement. – ISO, 2016. – 324 p. ISBN-10: 2832237266.

130. Severns, R., Design of Snubbers for Power Circuits [Электронный ресурс] – URL: <https://www.cde.com/resources/technical-papers/design.pdf>. – 07.12.2024 г.

131. Erickson, R.W., Fundamentals of Power Electronics, 3rd Edition / R. W. Erickson, D. Maksimovic. – Springer, 2020. – 1103 p. ISBN-10: 3030438791

132. Chanuri, Charina. A New Soft Switching PWM DC-DC Converter with Auxiliary Circuit and Centre-Tapped Transformer Rectifier / Charina Chanuri, Iqbala Shahid, Taib Soib // Procedia Engineering. –2013. – Vol 53. – P. 241 – 247.

133. Huang, Hong Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter [Электронный ресурс]. / Hong Huang // URL: https://www.researchgate.net/publication/265352196_3-1_Designing_an_LLC_Resonant_Half-Bridge_Power_Converter (дата обращения: 15.06.2024).

134. Accurate Design of High Efficiency LLC Resonant Converter With Wide Output Voltage [Электронный ресурс] / Hengshan Xu, Zhongdong Yin, Yushan Zhao, Yongzhang Huang // ResearchGate. – URL:

https://www.researchgate.net/publication/320093535_Accurate_Design_of_High_Efficiency_LLC_Resonant_Converter_With_Wide_Output_Voltage (дата обращения: 15.06.2024).

135. Luo, H. Optimal Design of a High Efficiency LLC Resonant Converter with a Narrow Frequency Range for Voltage Regulation [Электронный ресурс] / H. Luo, Y. Wang // Semantic Scholar. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimal-Design-of-a-High-Efficiency-LLC-Resonant-a-Luo-Wang/dc0c62f8ba80b47af85054165c61ae3fd19eb411> (дата обращения: 15.06.2024).

136. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. В 3-х выпусках. Выпуск 2. Внутрисистемные помехи и методы их уменьшения : сокр. пер. с англ./ под ред. А.И. Сапгира. – М.: Соврадио, 1978. – 272 с.

137. Павлыш, В. Н. Вычислительный алгоритм оценки эффективности защиты от электромагнитных полей в зависимости от параметров экранирующих материалов / В. Н. Павлыш, А. С. Чупахин // Проблемы искусственного интеллекта. – 2024 г. – №4 (35). – С.113-125. – DOI10.24412/2413-7383-2024-4-113-125.

138. Method for placing and laying of structured cabling systems in electromagnetic compatibility aspect / A. Chupakhin, V. Pilinsky, S. Scripchenko, V. Shvaichenko // Electronics and nanotechnology proceedings of the XXXII International Scientific Conference ELNANO 2012 (Kyiv, 10-12 April 2012). – К.: NTUU «КПІ». – Р. 131-132.

139. Матвеев, М.В. Электромагнитная совместимость цифровой аппаратуры на энергетических и промышленных объектах: контроль и улучшение электромагнитной обстановки / М.В. Матвеев // Новости электротехники. – 2007. – №2. – С. 34-42. – URL: http://www.news.elteh.ru/arh/2002/14/07_.php

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А.

Листинг программы моделирования электромагнитной обстановки на языке C#

EmcEnviroment.cs

```

using GalaSoft.MvvmLight;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Diagnostics;
using System.IO;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Media;

namespace EmcSuite.Modules.Simulation.Model {
    public class EmcEnviroment : ObservableObject {
        public int SegmentCount { get; set; }
        public List<Row> Rows { get; set; }
        public List<PowerSource> Sources { get; set; }
        public List<Obstacle> Obstacles { get; set; }
        Random rgen = new Random((int)DateTime.Now.Ticks);

        public EmcEnviroment() {
            Rows = new List<Row>();
            Sources = new List<PowerSource>();
            Obstacles = new List<Obstacle>();
        }

        public EmcEnviroment(int size) {
            Rows = new List<Row>();
            Sources = new List<PowerSource>();
            Obstacles = new List<Obstacle>();
            SegmentCount = size;
            Generate();
        }

        public void Generate() {
            Rows.Clear();

            for (int i = 0; i < SegmentCount; i++) {
                Row row = new Row();

                for (int j = 0; j < SegmentCount; j++) {
                    Cell cell = new Cell();
                    row.Cells.Add(cell);
                }

                Rows.Add(row);
            }
        }
    }
}

```

```

public void Simulate() {
    ClearSourceCells();
    var maxSignal = Signal.MinValue();
    var filteredSources = Sources.Where(s => s.IsEnabled == true);

    EnumerateCells(Rows, (cell, row, col) => {
        cell.Reset();
        MarkObstacleCells();
        if (cell.HasObstacle) return;

        foreach (var source in filteredSources) {
            if (row == source.Row && col == source.Column) {
                cell.Source = source;
            }
        }

        var attenuation = GetAttenuation(row, col, source);
        var signal = source.GetPowerForCell(row, col, attenuation);
        maxSignal = Signal.MaxValue(signal, maxSignal);
        cell.AddSignal(source, signal);
    })
);

    EnumerateCells(Rows, (cell, row, col) => {
        cell.ReferenceSignal = maxSignal;
        cell.Invalidate();
    });
}

public void Export() {
    var filePath =
Path.GetDirectoryName(Process.GetCurrentProcess().MainModule.FileName) + "\\last.csv";

    using (var writer = new StreamWriter(filePath)) {
        foreach (var row in Rows) {
            foreach (var cell in row.Cells) {
                writer.Write(cell.DisplayValue);
                writer.Write(", ");
            }
            writer.WriteLine();
        }
    };
}

private static void EnumerateCells(List<Row> rows, Action<Cell, int, int> action) {
    for (int i = 0; i < rows.Count; i++) {
        var row = rows[i];
        for (int j = 0; j < row.Cells.Count; j++) {
            var cell = row.Cells[j];
            action(cell, i, j);
        }
    }
}

```

```

}

private double GetAttenuation(int row, int column, PowerSource source) {
    int c_row = row;
    int c_column = column;
    double attenuation = 0;

    while (c_row != source.Row || c_column != source.Column) {
        if (c_row > source.Row) c_row--;
        else if (c_row < source.Row) c_row++;

        if (c_column > source.Column) c_column--;
        else if (c_column < source.Column) c_column++;

        if (Rows[c_row].Cells[c_column].HasObstacle) {
            attenuation += Rows[c_row].Cells[c_column].Obstacle.Attenuation;
        }
    }

    return attenuation;
}

private void ClearSourceCells() {
    foreach (var row in Rows) {
        foreach (var cell in row.Cells) {
            cell.Source = null;
            cell.Obstacle = null;
        }
    }
}

private void MarkObstacleCells() {
    var filteredObstacles = Obstacles.Where(o => o.IsEnabled == true);

    foreach (var row in Rows) {
        foreach (var cell in row.Cells) {
            cell.Obstacle = null;
        }
    }

    foreach (var obstacle in filteredObstacles) {
        int r = obstacle.Row;
        int c = obstacle.Column;

        for (int i = 0; i < obstacle.Width; i++) {
            for (int j = 0; j < obstacle.Height; j++) {
                Rows[r + i].Cells[c + j].Obstacle = obstacle;
            }
        }
    }
}

```

```
public void Invalidate() {  
    foreach (var item in Rows) {  
        item.Invalidate();  
    }  
}  
}  
}
```

Cell.cs

```
using GalaSoft.MvvmLight;
using OxyPlot;
using OxyPlot.Series;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Media;

namespace EmcSuite.Modules.Simulation.Model {
    public class Cell : ObservableObject {
        private Dictionary<PowerSource, Signal> _signals;

        [System.Xml.Serialization.XmlIgnore]
        public PlotModel PlotModel { get; set; }

        public Signal MaxSignal { get; set; }
        public Signal ReferenceSignal { get; set; }
        public string Format { get; set; }

        public PowerSource Source { get; set; }
        public bool HasSource {
            get { return Source != null; }
        }

        public Obstacle Obstacle { get; set; }
        public bool HasObstacle {
            get { return Obstacle != null; }
        }

        public Color Color {
            get {
                if (HasSource) {
                    return Color.FromArgb(255, 0, 255, 0);
                }

                if (HasObstacle) {
                    return Color.FromArgb(255, 255, 0, 0);
                }
            }
        }
    }
}
```

```

//var value = DisplayValue;
//var reference = ReferenceSignal.Extract(Format);
//var part = Math.Abs(value - reference);
//var color = (byte)Math.Min((int)part * 255, 255);

var color = (byte)Math.Abs(DisplayValue) - (byte)100;
color *= 5;
color = 255 - color;

return Color.FromArgb(255, (byte)color, 0, (byte)color);
}

public double DisplayValue {
    get { return MaxSignal.Extract(Format); }
}

public static double Distance(int row1, int column1, int row2, int column2) {
    double drow = row1 - row2;
    double dcolumn = column1 - column2;

    return Math.Sqrt(drow * 0.1 * drow * 0.1 + dcolumn * 0.1 * dcolumn * 0.1);
}

public static double Distance(int row, int column, Obstacle obstacle) {
    return Distance(row, column, obstacle.Row, obstacle.Column);
}

public static double Distance(int row, int column, PowerSource source) {
    return Distance(row, column, source.Row, source.Column);
}

public void Invalidate() {
    RaisePropertyChanged(() => HasSource);
    RaisePropertyChanged(() => HasObstacle);
    RaisePropertyChanged(() => DisplayValue);
    RaisePropertyChanged(() => Color);

    InvalidatePlot();
}

private void InvalidatePlot() {
    var series = new PieSeries {
        StrokeThickness = 1.0,
        InsideLabelPosition = 0.6,
        AngleSpan = 360,
        StartAngle = 0,
        InsideLabelFormat = string.Empty,
        OutsideLabelFormat = "{1}\r\n{0:G3}dBm",
        InsideLabelColor = OxyColors.White
    };
}

```

Obstacle.cs

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace EmcSuite.Modules.Simulation.Model {
    public class Obstacle {
        public string Name { get; set; }
        public int Row { get; set; }
        public int Column { get; set; }
        public int Width { get; set; }
        public int Height { get; set; }
        public double Attenuation { get; set; }
        public bool IsEnabled { get; set; }

        public Obstacle() {
            Name = "Преграда";
            Row = 0; Column = 0;
            Width = 1; Height = 1;
            Attenuation = 0.5;
        }
    }
}
```

```
public Obstacle(int row, int column) {  
    Row = row;  
    Column = column;  
}  
}  
}
```

PowerSource.cs

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace EmcSuite.Modules.Simulation.Model {
    public class PowerSource {
        public string Name { get; set; }
        public double Power { get; set; }
        public double Frequency { get; set; }
        public double Gain { get; set; }
        public double ElectricField { get; set; }
        public double LossTx { get; set; }
        public double LossRx { get; set; }
        public double WaveResistance { get; set; }
        public int Row { get; set; }
        public int Column { get; set; }
        public double Height { get; set; }
        public double Lambda { get; set; }
        public double EdgeDistance { get; set; }
        public double Charge { get; set; }
        public bool IsEnabled { get; set; }

        public PowerSource() {
            Name = "Source";
            Power = 0;
            Frequency = 1000000;
            Gain = 0;
            LossTx = 0; LossRx = 0;
            WaveResistance = 0;
            Row = 0;
            Column = 0;
            Lambda = 0;
            EdgeDistance = 0;
            Charge = 0;
            Height = 1.5;
            IsEnabled = true;
        }

        public Signal GetPowerForCell(int row, int column, double attenuation) {
            double d0 = 0.2;
            double d = (double)Cell.Distance(row, column, this) * d0;
            double power = Power * Math.Exp(-d / d0);
            return new Signal(power, Frequency);
        }
    }
}
```

Row.cs

```
using GalaSoft.MvvmLight;  
using System;
```

```

using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace EmcSuite.Modules.Simulation.Model {
    public class Row : ObservableObject {
        public List<Cell> Cells { get; set; }

        public Row() {
            Cells = new List<Cell>();
        }

        public void Invalidate() {
            foreach (var item in Cells) {
                item.Invalidate();
            }
        }
    }
}

```

Signal.cs

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace EmcSuite.Modules.Simulation.Model {
    public class Signal {
        public static string DefaultFormat = "Prx";

        public double Erd { get; set; }
        public double Loses { get; set; }
        public double PrdInDbm { get; set; }
        public double Rssi { get; set; }
        public double E { get; set; }

        public double Prx { get; set; }
        public double Pl { get; set; }

        public double Extract(string format) {
            switch (format) {
                case "Erd":
                    return Erd;
                case "Loses":
                    return Loses;
                case "Prd":

```

```

        return PrdInDbm;

    case "Rssi":
        return Rssi;

    case "E":
        return E;

    case "Prx":
        return Prx;

    case "Pl":
        return Pl;
    }

    return 1.0;
}

public static Signal MaxValue(Signal v1, Signal v2) {
    return new Signal() {
        Erd = Math.Max(v1.Erd, v1.Erd),
        Loses = Math.Max(v1.Loses, v2.Loses),
        PrdInDbm = Math.Max(v1.PrdInDbm, v2.PrdInDbm),
        Rssi = Math.Max(v1.Rssi, v2.Rssi),
        E = Math.Max(v1.E, v2.E),
        Prx = Math.Max(v1.Prx, v2.Prx),
        Pl = Math.Max(v1.Pl, v2.Pl)
    };
}

public static Signal MinValue() {
    return new Signal() {
        Erd = double.MinValue, E = double.MinValue,
        Loses = double.MinValue, PrdInDbm = double.MinValue,
        Prx = double.MinValue, Pl = double.MinValue,
        Rssi = double.MinValue
    };
}
}

```

Приложение Б.**Листинг программы оценки эффективности защиты от электромагнитных полей в зависимости от параметров экранирующих материалов в среде MATLAB**

```

% Алгоритм математической аппроксимации значений магнитной проницаемости материалов 79Н, АМАГ-170, 50Н
% CHAS 2024
%-----

clc;
clear all;

% Данные для материала 79Н
f = [30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000] ;
x = [ 130000, 120000, 110000, 108000, 100000, 98000, 96000, 92000, 88000, 80000, 75000, 72000, 68000, ...
166000, 65000, 62000, 60800, 50000, 41000, 38000, 31000, 28000];

% Аппроксимация данных для материала 79Н
p1 = fit (f', x', 'power2');
f2 = 10:10:40000;
x2 = (p1.a) * f2 .^ (p1.b) + (p1.c);

% Построение графика аппроксимации для материала 79Н
figure (1);
plot(f2, x2, f, x , 'o');
xlabel('Частота (Hz)');
ylabel('\mu_{r} (Относительная магнитная проницаемость)');
title('Аппроксимация \mu_r для материала 79Н');

% Логарифмическая шкала для материала 79Н
figure(2);
loglog (f2, x2);
legend ('\mu_r 79Н');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('\mu_r (Относительная магнитная проницаемость)');
grid on;
%-----

% Данные для материала АМАГ-170
f3 = [50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 , 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, ...
7000, 8000, 9000, 10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000, 80000, 90000, 100000];
x3 = [500000, 490000, 480000, 460000, 440000, 420000, 390000, 345000, 325000, 300000, 295000, ...
290000, 285000, 280000, 255000, 215000, 195000, 180000, 170000, 160000, 150000, 145000, 135000, ...
130000, 95000, 75000, 67000, 62000, 55000, 50000, 49000, 42000, 38000];

% Аппроксимация данных для материала АМАГ-170
P2 = fit (f3', x3', 'power2');
f4 = 10:10:100000;
x4 = (p2.a) * f4 .^ (p2.b) + (p2.c);

% Построение графика аппроксимации для материала АМАГ-170
figure (3);
plot (f4, x4, f3, x3 , 'o');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('\mu_r (Относительная магнитная проницаемость)');
title('Аппроксимация \mu_r для материала АМАГ-170');

% Логарифмическая шкала для АМАГ-170
figure(4);
loglog (f4, x4);
legend ('\mu_r АМАГ-170');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('\mu_r (Относительная магнитная проницаемость)');
grid on;
%-----

% Данные для материала 50Н
f5 = [70, 300, 900, 2000, 5000, 10000, 20000, 30000, 40000, 50000];

```

```

x5 = [260000, 190000, 135000, 90000, 52000, 32000, 20000, 16500, 12000, 10000];

% Интерполяция данных для материала 50Н
f6 = 70:10:50000;
x6 = interp1(f5, x5, f6);

% Аппроксимация данных для материала 50Н
p3 = fit(f6', x6', 'power2') ;
f7 = 10:10:70000;
x7 = (p3.a) *f7 .^ (p3.b) + (p3.c);

% Построение графика аппроксимации для материала 50Н
figure(5) ;
plot (f7, x7, f5, x5, 'o');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel (' $\mu_r$  (Относительная магнитная проницаемость)');

% Логарифмическая шкала для 50Н
figure (6) ;
loglog (f7, x7);
legend (' $\mu_r$  50Н');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel (' $\mu_r$  (Относительная магнитная проницаемость)');
grid on;
%-----

% Сравнение аппроксимаций для всех материалов
figure(7);
loglog(f2, x2, '-.', f4, x4, '--', f7, x7, '-');
grid on;
legend(' $\mu_r$  79Н', ' $\mu_r$  АМАГ-170', ' $\mu_r$  50Н');
xlabel('Частота (Hz)'); ylabel(' $\mu_r$  (Относительная магнитная проницаемость)');
title('Сравнение  $\mu_r$  для всех материалов');

% Сохранение расчетных данных материала в файл data.mat
data.mat1 = x2;
data.freq1 = f2;
data.mat2 = x4;
data.freq2 = f4;
data.mat3 = x7;
data.freq3 = f7;
save('data.mat ', '- struct', 'data');
%-----

% Алгоритм расчета эффективности экранирования (SE) для следующих материалов: 79Н, АМАГ-170, 50Н, М00К.
% CHAS -2024
%-----

clear all;
clc;

%Частоты, используемые в расчетах
Freq = 10:10:100000;

% Загрузка данных материалов из файла data.mat
% Файл содержит переменные: mat1, mat2, mat3, freq1, freq2, freq3
load ('data.mat');

% Константы и параметры
% Константа для расчета затухания при поглощении

K1 = 131.4;
% Коэффициент для электрического и магнитного полей
C1 = 0.0117;
C2 = 5.35;
C3 = 322;
% Расстояние от источника ЭМИ до экрана в метрах
r = 10;
% Толщина экрана в метрах
l = 0.0002;

```

```

%Параметры материалов
% 79Н
M1_ur = mat1; %Проницаемость
M1_gr = 0.034; % Проводимость
% АМАГ-170
M2_ur = mat2; %Проницаемость
M2_gr = 0.012; %Проводимость
% 50Н
M3_ur = mat3; %Проницаемость
M3_gr = 0.027; %Проводимость
% М00К
M4_ur = 1; %Проницаемость
M4_gr = 0.999; %Проводимость
%-----
% Затухание при поглощении А электрических и магнитных полей
A_M1 = K1 * 1 * sqrt((freq1 .* M1_ur) .* M1_gr);
A_M2 = K1 * 1 * sqrt((freq2 .* M2_ur) .* M2_gr);
A_M3 = K1 * 1 * sqrt((freq3 .* M3_ur) .* M3_gr);
A_M4 = K1 * 1 * sqrt((Freq .* M4_ur) .* M4_gr);

% График затухания при поглощении (A)
figure(1);
set(gca, 'fontsize', 12);
loglog(freq1, A_M1, freq2, A_M2, freq3, A_M3, Freq, A_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Затухание за счет поглощения - A');
xlabel('Частота (Hz)');
ylabel ('Затухание за счет поглощения (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'М00К');
%-----
% Затухание при отражении магнитного поля (Rm)
Rm_M1 = 20 * log10((C1 ./ (r .* sqrt ((freq1 .* M1_gr) ./ M1_ur))) + ...
(C2 .* (r .* sqrt ((freq1 .* M1_gr) ./ M1_ur))) + 0.354);
Rm_M2 = 20 * log10 ((C1 ./ (r .* sqrt((freq2 .* M2_gr) ./ M2_ur))) + (C2 ...
.* (r .* sqrt((freq2 .* M2_gr) ./ M2_ur))) + 0.354);
Rm_M3 = 20 * log10 ((C1 ./ (r .* sqrt((freq3 .* M3_gr) ./ M3_ur))) + (C2 ...
.* (r .* sqrt((freq3 .* M3_gr) ./ M3_ur))) + 0.354);
Rm_M4 = 20 * log10 ((C1 ./ (r .* sqrt((Freq .* M4_gr) ./ M4_ur))) + (C2 ...
.* (r .* sqrt((Freq .* M4_gr) ./ M4_ur))) + 0.354);

% График затухания при отражении магнитного поля (Rm)
figure(2);
set (gca, 'fontsize',12);
semilogx (freq1, Rm_M1, freq2, Rm_M2, freq3, Rm_M3, Freq, Rm_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title ('Затухание за счет отражения - R (магнитные поля)');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Затухание за счет отражения (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'М00К');
%-----
% Потери на отражение электрического поля (Re)
Re_M1 = C3 - (10 * log10((M1_ur .* freq1.^3 * r.^2) / M1_gr));
Re_M2 = C3 - (10 * log10((M2_ur .* freq2.^3 * r.^2) / M2_gr));
Re_M3 = C3 - (10 * log10((M3_ur .* freq3.^3 * r.^2) / M3_gr));
Re_M4 = C3 - (10 * log10((M4_ur .* Freq.^3 * r.^2) / M4_gr));

% График затухания при отражении электрического поля (Re)
figure (3);
set (gca, 'fontsize', 12);
semilogx (freq1, Re_M1, freq2, Re_M2, freq3, Re_M3, Freq, Re_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title ('Затухание за счет отражения R (электрические поля)');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Затухание за счет отражения (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'М00К');

```

```

% Затухание при отражении плоских волн (Rp)
Rp_M1 = 168 - 20 * log10 (sqrt ((freq1. * M1_ur) / M1_gr));
Rp_M2 = 168 - 20 * log10 (sqrt ((freq2. * M2_ur) / M2_gr));
Rp_M3 = 168 - 20 * log10 (sqrt ((freq3. * M3_ur) / M3_gr));
Rp_M4 = 168 - 20 * log10 (sqrt ((Freq. * M4_ur) / M4_gr));

% График затухания при отражении плоских волн (Rp)
figure(4);
set (gca, 'fontsize', 12);
semilogx (freq1, Rp_M1, freq2, Rp_M2, freq3, Rp_M3, Freq, Rp_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title ('Затухание за счет отражения R (плоские волны)');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Затухание за счет отражения (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'M00K');
%-----

% Общее затухание для магнитных полей (TotalM)
TotalM_M1 = A_M1 + Rm_M1;
TotalM_M2 = A_M2 + Rm_M2;
TotalM_M3 = A_M3 + Rm_M3;
TotalM_M4 = A_M4 + Rm_M4;

% График общего затухания для магнитных полей (TotalM)
figure(5);
set (gca, 'fontsize', 12);
semilogx (freq1, TotalM_M1, freq2, TotalM_M2, freq3, TotalM_M3, Freq, TotalM_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title ('Общее затухание магнитных полей (A + R)');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Общее затухание (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'M00K');
%-----

Общее затухание электрических полей (TotalE)
TotalE_M1 = A_M1 + Re_M1;
TotalE_M2 = A_M2 + Re_M2;
TotalE_M3 = A_M3 + Re_M3;
TotalE_M4 = A_M4 + Re_M4;

% График полных потерь электрических полей (TotalE)
figure(6);
set (gca, 'fontsize', 12);
semilogx (freq1, TotalE_M1, freq2, TotalE_M2, freq3, TotalE_M3, Freq, TotalE_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title ('Сумма затухания (A + R) электрических полей');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Общее затухание (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'M00K');
%-----

%Общее затухание плоских волн (TotalP)
TotalP_M1 = A_M1 + Rp_M1;
TotalP_M2 = A_M2 + Rp_M2;
TotalP_M3 = A_M3 + Rp_M3;
TotalP_M4 = A_M4 + Rp_M4;

% График общего затухания плоских волн (TotalP)
figure(7);
set (gca, 'fontsize', 12);
semilogx (freq1, TotalP_M1, freq2, TotalP_M2, freq3, TotalP_M3, Freq, TotalP_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title ('Общее затухание плоских волн (A + R)');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Общее затухание (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'M00K');
%-----

% Поправочный коэффициент многократного отражения (mM) для магнитного поля
mM_M1 = (4.7e-2 ./ r) .* sqrt(M1_ur ./ (freq1 .* M1_gr));
mM_M2 = (4.7e-2 ./ r) .* sqrt(M2_ur ./ (freq2 .* M2_gr));

```

```

mM_M3 = (4.7e-2 ./ r) .* sqrt(M3_ur ./ (freq3 .* M3_gr));
mM_M4 = (4.7e-2 ./ r) .* sqrt(M4_ur ./ (Freq .* M4_gr));

% Коэффициент отражения магнитного поля (GammaM)
GammaM_M1 = 4 .* (((1 - (mM_M1 .^2)) .^2 - (2 .* (mM_M1 .^2)) + (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mM_M1 .* (1 - (mM_M1. ^2)))) ... ./ (((1 + (sqrt(2) .* mM_M1)). ^2 + 1). ^2));
GammaM_M2 = 4 .* (((1 - (mM_M2 .^2)) .^2 - (2 .* (mM_M2 .^2)) + (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mM_M2 .* (1 - (mM_M2. ^2)))) ... ./ (((1 + (sqrt(2) .* mM_M2)). ^2 + 1). ^2));
GammaM_M3 = 4 .* (((1 - (mM_M3 .^2)) .^2 - (2 .* (mM_M3 .^2)) + (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mM_M3 .* (1 - (mM_M3. ^2)))) ... ./ (((1 + (sqrt(2) .* mM_M3)). ^2 + 1). ^2));
GammaM_M4 = 4 .* (((1 - (mM_M4 .^2)) .^2 - (2 .* (mM_M4 .^2)) + (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mM_M4 .* (1 - (mM_M4. ^2)))) ... ./ (((1 + (sqrt(2) .* mM_M4)). ^2 + 1). ^2));

% Поправочный коэффициент многократного отражения для магнитного поля (CM)
CM_M1 = 20 .* log(1 - (GammaM_M1 .* (10. ^ (-A_M1 ./ 10)) .* (cos(0.23 .* A_M1) - (1i .* sin(0.23 .* A_M1)))); CM_M2 = 20 .* log(1 - (GammaM_M2 .* (10. ^ (-A_M2 ./ 10)) .* (cos(0.23 .* A_M2) - (1i .* sin(0.23 .* A_M2)))); CM_M3 = 20 .* log(1 - (GammaM_M3 .* (10. ^ (-A_M3 ./ 10)) .* (cos(0.23 .* A_M3) - (1i .* sin(0.23 .* A_M3)))); CM_M4 = 20 .* log(1 - (GammaM_M4 .* (10. ^ (-A_M4 ./ 10)) .* (cos(0.23 .* A_M4) - (1i .* sin(0.23 .* A_M4))));

% Величина поправочного коэффициента магнитного поля
magCM_M1 = abs(CM_M1);
magCM_M2 = abs(CM_M2);
magCM_M3 = abs(CM_M3);
magCM_M4 = abs(CM_M4);

% График поправочного коэффициента (B) для магнитного поля
figure(8);
set(gca, 'fontsize', 12);
semilogx(freq1, magCM_M1, freq2, magCM_M2, freq3, magCM_M3, Freq, magCM_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Поправочный коэффициент (B) для магнитных полей');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Поправочный коэффициент B(dB)');
legend ('79Н', 'AMAG-170', '50Н', 'M00K');

%-----
% Поправочный коэффициент многократного отражения (mE) для электрического поля
mE_M1 = 0.205e-16 .* r .* sqrt((M1_ur.*freq1.^ 3) ./ M1_gr);
mE_M2 = 0.205e-16 .* r .* sqrt((M2_ur.*freq2.^ 3) ./ M2_gr);
mE_M3 = 0.205e-16 .* r .* sqrt((M3_ur.*freq3.^ 3) ./ M3_gr);
mE_M4 = 0.205e-16 .* r .* sqrt((M4_ur.* Freq.^ 3) ./ M4_gr);

% Коэффициент отражения электрического поля (GammaE)
GammaE_M1 = 4 .* (((1 - (mE_M1.^2)).^2 - (2 .* (mE_M1.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mE_M1... .* (1 - (mE_M1.^2)))) ./ (((1 - (sqrt(2) .* mE_M1)).^2 + 1).^2));
GammaE_M2 = 4 .* (((1 - (mE_M2.^2)).^2 - (2 .* (mE_M2.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mE_M2... .* (1 - (mE_M2.^2)))) ./ (((1 - (sqrt(2) .* mE_M2)).^2 + 1).^2));
GammaE_M3 = 4 .* (((1 - (mE_M3.^2)) .^2 - (2 .* (mE_M3.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mE_M3... .* (1 - (mE_M3.^2)))) ./ (((1 - (sqrt(2) .* mE_M3)). ^2 + 1). ^2));
GammaE_M4 = 4 .* (((1 - (mE_M4.^2)) .^2 - (2 .* (mE_M4.^2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .* mE_M4... .* (1 - (mE_M4.^2)))) ./ (((1 - (sqrt(2) .* mE_M4)). ^2 + 1). ^2));

% Поправочный коэффициент многократного отражения для электрического поля (CE)
CE_M1 = 20 .* log(1 - (GammaE_M1 .* (10. ^ (-A_M1 ./ 10)) .* (cos(0.23 .* A_M1) - (1i .* sin(0.23 .* A_M1)))); CE_M2 = 20 .* log(1 - (GammaE_M2 .* (10. ^ (-A_M2 ./ 10)) .* (cos(0.23 .* A_M2) - (1i .* sin(0.23 .* A_M2)))); CE_M3 = 20 .* log(1 - (GammaE_M3 .* (10. ^ (-A_M3 ./ 10)) .* (cos(0.23 .* A_M3) - (1i .* sin(0.23 .* A_M3)))); CE_M4 = 20 .* log(1 - (GammaE_M4 .* (10. ^ (-A_M4 ./ 10)) .* (cos(0.23 .* A_M4) - (1i .* sin(0.23 .* A_M4))));

% Величина поправочного коэффициента электрического поля
magCE_M1 = abs(CE_M1);
magCE_M2 = abs(CE_M2);
magCE_M3 = abs(CE_M3);
magCE_M4 = abs(CE_M4);

% График поправочного коэффициента (B) для электрического поля
figure(9);
set (gca, 'fontsize', 12);

```

```

semilogx (freq1, magCE_M1, freq2, magCE_M2, freq3, magCE_M3, Freq, magCE_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Поправочный коэффициент (B) для электрических полей');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Поправочный коэффициент (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'M00К');

%-----
% Поправочный коэффициент многократного отражения (mP) для плоской волны
mP_M1 = 9.77e-10 .* sqrt ((freq1 .* M1_ur) ./ M1_gr);
mP_M2 = 9.77e-10 .* sqrt ((freq2 .* M2_ur) ./ M2_gr);
mP_M3 = 9.77e-10 .* sqrt ((freq3 .* M3_ur) ./ M3_gr);
mP_M4 = 9.77e-10 .* sqrt ((Freq .* M4_ur) ./ M4_gr);

% Коэффициент отражения плоской волны
GammaP_M1 = 4 .* ((1 - (mP_M1 .^ 2)) .^ 2 - (2 .* (mP_M1 .^ 2)) - (1i * (2 .* sqrt(2)) .*...
mP_M1 .* (1- (mP_M1 .^ 2)))) ./ ((1 + (sqrt (2) .* mP_M1)) .^ 2 + 1) .^ 2));
GammaP_M2 = 4 .* ((1 - (mP_M2 .^ 2)) .^ 2 - (2 .* (mP_M2 .^ 2)) - (1i * (2 .* sqrt (2)) .*...
mP_M2 .* (1 - (mP_M2 .^ 2)))) ./ ((1 + (sqrt (2) .* mP_M2)) .^ 2 + 1) .^ 2));
GammaP_M3 = 4 .* ((1 - (mP_M3 .^ 2)) .^ 2 - (2 .* (mP_M3 .^ 2)) - (1i * (2 .* sqrt (2)) .*...
mP_M3 .* (1 - (mP_M3 .^ 2)))) ./ ((1 + (sqrt (2) .* mP_M3)) .^ 2 + 1) .^ 2));
GammaP_M4 = 4 .* ((1 - (mP_M4 .^ 2)) .^ 2 - (2 .* (mP_M4 .^ 2)) - (1i * (2 .* sqrt (2)) .*...
mP_M4 .* (1 - (mP_M4 .^ 2)))) ./ ((1 + (sqrt (2) .* mP_M4)) .^ 2 + 1) .^ 2));

% Поправочный коэффициент многократного отражения для плоской волны
CP_M1 = 20 .* log(1 - (GammaP_M1 .* (10 .^ (- A_M1 ./ 10)) .* (cos (0.23 .* A_M1) - (1i .* sin(0.23 .* A_M1))))) ;
CP_M2 = 20 .* log(1 - (GammaP_M2 .* (10 .^ (- A_M2 ./ 10)) .* (cos(0.23 .* A_M2) - (1i .* sin(0.23 .* A_M2))))) ;
CP_M3 = 20 .* log(1 - (GammaP_M3 .* (10 .^ (- A_M3 ./ 10)) .* (cos (0.23 .* A_M3) - (1i .* sin(0.23 .* A_M3))))) ;
CP_M4 = 20 .* log(1 - (GammaP_M4 .* (10 .^ (- A_M4 ./ 10)) .* (cos (0.23 .* A_M4) - (1i .* sin(0.23 .* A_M4))))) ;

% Величина поправочного коэффициента для плоской волны
magCP_M1 = abs(CP_M1);
magCP_M2 = abs(CP_M2);
magCP_M3 = abs(CP_M3);
magCP_M4 = abs(CP_M4);

% График поправочного коэффициента для плоской волны
figure(10);
set (gca, 'fontsize', 12);
semilogx (freq1, magCP_M1, freq2, magCP_M2, freq3, magCP_M3, Freq, magCP_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Поправочный коэффициент (B) для плоских волн');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Поправочный коэффициент (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'M00К');

%-----
% Эффективность экранирования (SEm) магнитного поля
SEm_M1 = A_M1 + Rm_M1 - magCM_M1;
SEm_M2 = A_M2 + Rm_M2 - magCM_M2;
SEm_M3 = A_M3 + Rm_M3 - magCM_M3;
SEm_M4 = A_M4 + Rm_M4 - magCM_M4;

% График эффективности экранирования (SEm) магнитного поля
figure(11);
set (gca, 'fontsize', 12);
semilogx (freq1, SEm_M1, freq2, SEm_M2, freq3, SEm_M3, Freq, SEm_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Эффективность экранирования (SE = A + R + B) для магнитного поля');
xlabel ('Частота (Hz)');
ylabel ('Эффективность экранирования (dB)');
legend ('79Н', 'АМАГ-170', '50Н', 'M00К');

%-----
% Эффективность экранирования (SEe) для электрического поля
SEe_M1 = A_M1 + Re_M1 - magCE_M1;
SEe_M2 = A_M2 + Re_M2 - magCE_M2;
SEe_M3 = A_M3 + Re_M3 - magCE_M3;
SEe_M4 = A_M4 + Re_M4 - magCE_M4;

```

```

% График эффективности экранирования (SEe) электрического поля
figure(12);
set(gca, 'fontsize', 12);
semilogx(freq1, SEe_M1, freq2, SEe_M2, freq3, SEe_M3, Freq, SEe_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Эффективность экранирования (SE = A + R + B) для электрического поля');
xlabel('Частота (Hz)');
ylabel('Эффективность экранирования (dB)');
legend('79Н', 'AMAG-170', '50Н', 'M00K');

%-----
% Эффективность экранирования (SEP) плоской волны
SEP_M1 = A_M1 + Rp_M1 - magCP_M1;
SEP_M2 = A_M2 + Rp_M2 - magCP_M2;
SEP_M3 = A_M3 + Rp_M3 - magCP_M3;
SEP_M4 = A_M4 + Rp_M4 - magCP_M4;

% График эффективности экранирования (SEP) для плоской волны
figure (13);
set(gca, 'fontsize', 12);
semilogx(freq1, SEP_M1, freq2, SEP_M2, freq3, SEP_M3, Freq, SEP_M4, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Эффективность экранирования (SE = A + R + B) для плоских волн');
xlabel('Частота (Hz)');
ylabel('Эффективность экранирования (dB)');
legend('79Н', 'AMAG-170', '50Н', 'M00K');

%-----
% Сравнение эффективности экранирования АМАГ-170
figure(14);
set(gca, 'fontsize', 12);
semilogx(freq2, SEP_M2, '--', freq2, SEe_M2, '-.', freq2, SEm_M2, 'LineWidth', 2);
grid on;
title('Эффективность экранирования SE для АМАГ-170 с t = 0,1мм');
xlabel('Частота (Hz)');
ylabel('Эффективность экранирования (dB)');
legend('Плоские волны с r = 10м', 'Электрическое поле', 'Магнитное поле с r = 10м', 'Location', 'best')

```

Листинг программы проектирования и подбора помехоподавляющих фильтров
на языке C++

Unit1.cpp – основные программные методы и переменные;

```

//-----
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "Unit1.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"
#define top_shift 35
#define Mkv0 1e-6
#define SEARCH_DIR "Filters"

TForm1 *Form1;
int select_row;
String CurrentDir;
int filters_number = 0;
TStringList* FL = new TStringList();
TFloatList* OptimalFilter;
//-----
fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
    : TForm(Owner)
{
}
//-----
// Метод, который отвечает за пропорциональное размещение элементов на
// форме, во время изменения размера формы.
void __fastcall TForm1::Resizer()
{
    Panell->Left    = 0;
    Panell->Top     = top_shift;
    Panell->Width   = Form1->Width;
    Panell->Height  = Form1->Height-75-top_shift;
    GroupBox1->Left = 5;
    GroupBox1->Top  = 5;
    GroupBox1->Height = Panell->Height - 10;
    GroupBox2->Left = GroupBox1->Width+10;
    GroupBox2->Top  = 5;
    GroupBox2->Width = Panell->Width - GroupBox2->Left-20;

    GroupBox3->Left = GroupBox1->Width+10;
    GroupBox3->Top  = Panell->Height - GroupBox3->Height - 5;
    GroupBox3->Width = GroupBox2->Width;
    GroupBox2->Height = GroupBox3->Top - 5;

    Chart1->Left = 5;
    Chart1->Top  = 15;
    Chart1->Width = GroupBox2->Width - 10;
    Chart1->Height = GroupBox2->Height - 60;
}

```

```

    CheckBox1->Top = Chart1->Height + 20;
//  CheckBox2->Top = Chart1->Height + 20;
    CheckBox3->Top = Chart1->Height + 40;
//  CheckBox4->Top = Chart1->Height + 40;

    StringGrid1->Width = GroupBox1->Width - 6;
    StringGrid1->Left = 3;
    StringGrid1->Top = 15;
    StringGrid1->Height = GroupBox1->Height - 45;
    Memo1->Width = GroupBox3->Width - 30;

    StringGrid1->DefaultColWidth = (int)((GroupBox1->Width - 35)/2);

    Form1->HorzScrollBar->Visible = false;
    Form1->VertScrollBar->Visible = false;
}

// Метод, который ищет данные из строки. Ячейки разделены ";"
float __fastcall TForm1::GetValueFromList(AnsiString str, int cell)
{
    char delimiter = ';';
    int pos = 1, current = 0;
    while(current<cell)
    {
        if (!(pos = str.Pos(delimiter))) break;
        str = str.SubString(pos+1, str.Length() - pos);
        current++;
    }
    if (str.Pos(delimiter)) str = str.SubString(1, str.Pos(delimiter)-1);
    else str = str.SubString(1, str.Length());
    return StrToFloat(str);
}

// Метод выдает уровень на частоте f соответственно нормам (f - frequency
// in MHz)
float __fastcall TForm1::GetValueFromNorm(float f)
{
    if ((f>0.1) && (f<30))
    {
        return 30;
    }
    return 0.0;
}

// Метод, который переводит мкВ в дБ
float __fastcall TForm1::ConvertMkvIntoDb(float x)
{
    if (x == 0) x = Mkv0;
    return 20*Log10(x/Mkv0);
}

// Метод, который рисует график допустимых уровней помех
void __fastcall TForm1::DrawChartFromNorm(float x1, float x2)
{
    float i;
    Chart1->Series[0]->Clear();
    if (x1<0.15) x1 = 0.15;
}

```

```

if (x2>30.0) x2 = 30.0;
for (i = x1; i<x2; i+=0.01)
{
    Chart1->Series[0]->AddXY(i, GetValueFromNorm(i));
}
}

// Метод возвращает адрес объекта, который содержит данные фильтра
TFloatList* __fastcall TForm1::getFilterValue(String FName)
{
    TStringList* list = new TStringList();
    TFloatList* FilterValues = new TFloatList();
    int i = 0;
    list->Delimiter = ';';
    list->LoadFromFile(FName);
    if (list->Count > 0)
    {
        i = 0;
        while(i<list->Count)
        {
            FilterValues->add(GetValueFromList(list->Strings[i],0),
            GetValueFromList(list->Strings[i],1));
            i++;
        }
    }
    return FilterValues->getFirst();
}

// Метод возвращает модуль числа типа Float
float __fastcall TForm1::fabs(float x)
{
    return (x>0)?x:-x;
}

// Метод возвращает значение затухания фильтра Filter на частоте x
float __fastcall TForm1::getFilterValue(TFloatList* Filter, float x)
{
    int i;
    float x1 = 0.0, x2 = 0.0, y1 = 0.0, y2 = 0.0;
    i = 0;
    while(i<Filter->getCount())
    {
        if (x == Filter->getArr(i)[0]) return Filter->getArr(i)[1];
        if ((x-Filter->getArr(i)[0])<0){
            x2 = Filter->getArr(i)[0];
            y2 = Filter->getArr(i)[1];
            break;
        }
        i++;
    }

    x1 = Filter->getArr(i)[0];
    y1 = Filter->getArr(i)[1];
}
if (i == (Filter->getCount()-1))
{
    x1 = Filter->getArr(i-1)[0];
    y1 = Filter->getArr(i-1)[1];
}

```

```

    if (x2 == x1) return y1;
    return (y2-y1)*(x-x1)/(x2-x1)+y1;
}

// Метод вычисляет на сколько понизится уровень помех после фильтра
float __fastcall TForm1::overSignalAFC(TFloatList* Signal, TFloatList* Filter)
{
    int i = 0;
    float SumRez = 0.0;
    while(i<Signal->getCount())
    {
        SumRez += Signal->getArr(i)[1] - getFilterValue(Filter, Filter->getArr(i)[0]);
        i++;
    }
    return SumRez/Signal->getCount();
}

// Метод переводит информацию с таблицы (слева) в объект
TFloatList* __fastcall TForm1::getListFromStringGrid()
{
    int i = 1;
    TFloatList* Signal = new TFloatList();
    while((i<=StringGrid1->RowCount) && (!StringGrid1->Cells[0][i].IsEmpty()) && (!StringGrid1->Cells[1][i].IsEmpty()))
    {
        Signal->add(StrToInt(StringGrid1->Cells[0][i]),
        ConvertMkvIntoDb(StrToInt(StringGrid1->Cells[1][i])));
        i++;
    }
    return Signal;
}

// Метод возвращает массив объектов данных фильтров
TFloatList** __fastcall TForm1::getFilterList()
{
    int iAttributes = 0, i = 0;
    AnsiString aPath = CurrentDir+"\Filters\*.csv";
    TSearchRec SearchRec;
    TFloatList** CalculateList;
    if (FindFirst(aPath, iAttributes, SearchRec) == 0)
    {
        do
        {
            FL->Add(CurrentDir+"\Filters\"+SearchRec.Name);
        }while (FindNext(SearchRec) == 0);
        FindClose(SearchRec);
    } else ShowMessage("Error find file in "+aPath);

    CalculateList = new TFloatList*[FL->Count];
    i = 0;
    filters_number = FL->Count;
    while(i<FL->Count)
    {
        CalculateList[i] = getFilterValue(FL->Strings[i]);
        i++;
    }
}

```

```

    return CalculateList;
}

void __fastcall TForm1::FindOptimalFilter(TFloatList* Emision)
{
}

// Метод выводит информацию в нижнюю командную строку
void __fastcall TForm1::Mess(String str)
{
    Memo1->Lines->Add(str);
}
// Метод, который вызывается при создании формы
void __fastcall TForm1::FormCreate(TObject *Sender)
{
    Panel1->Caption = "";
    CurrentDir = GetCurrentDir();
    StringGrid1->Cells[0][0] = "      f, МГц";
    StringGrid1->Cells[1][0] = "      U, мВ/м";
    Resizer();
}

// Метод, который вызывается при изменении размеров формы
void __fastcall TForm1::FormResize(TObject *Sender)
{
    Resizer();
}
// Выход из программы
void __fastcall TForm1::N5Click(TObject *Sender)
{
    exit(0);
}
// Открытие файла экспериментальных данных
void __fastcall TForm1::ToolButton1Click(TObject *Sender)
{
    TStringList* list = new TStringList();
    int i = 0;
    if ((OpenDialog1->Execute()) && (OpenDialog1->FileName != ""))
    {
        list->Delimiter = ';';
        list->LoadFromFile(OpenDialog1->FileName);
        i = 1;
        StringGrid1->RowCount = list->Count+1;
        while(i<=list->Count)
        {
            StringGrid1->Cells[0][i]      =      FloatToStr(GetValueFromList(list->Strings[i-1],0));
            StringGrid1->Cells[1][i]      =      FloatToStr(GetValueFromList(list->Strings[i-1],1));
            i++;
        }
        StatusBar1->Panels->Items[1]->Text = "File: "+OpenDialog1->FileName;
        Mess("Файл "+OpenDialog1->FileName+" успешно загружен.");
    }
    delete list;
}

```

```

// Сохранение данных
void __fastcall TForm1::ToolButton2Click(TObject *Sender)
{
    int i = 0;
    TStringList* list = new TStringList();
    i = 1;
    while((i<=StringGrid1->RowCount)           &&           (!StringGrid1-
>Cells[0][i].IsEmpty()) && (!StringGrid1->Cells[1][i].IsEmpty()))
    {
        list->Add(StringGrid1->Cells[0][i]+';'+StringGrid1-
>Cells[1][i]+';');
        i++;
    }
    if (!OpenDialog1->FileName.IsEmpty())
    {
        list->SaveToFile(OpenDialog1->FileName);
    }   else   if      (SaveDialog1->Execute()      &&      (!SaveDialog1-
>FileName.IsEmpty()))
    {
        list->SaveToFile(SaveDialog1->FileName);
    }
    Mess("Файл "+SaveDialog1->FileName+" успешно сохранен.");
    delete list;
}
// Сохранение в другой файл
void __fastcall TForm1::ToolButton3Click(TObject *Sender)
{
    int i = 0;
    TStringList* list = new TStringList();
    i = 1;
    while((i<=StringGrid1->RowCount)           &&           (!StringGrid1-
>Cells[0][i].IsEmpty()) && (!StringGrid1->Cells[1][i].IsEmpty()))
    {
        list->Add(StringGrid1->Cells[0][i]+';'+StringGrid1-
>Cells[1][i]+';');
        i++;
    }
    if (SaveDialog1->Execute() && (!SaveDialog1->FileName.IsEmpty()))
    {
        list->SaveToFile(SaveDialog1->FileName);
        OpenDialog1->FileName = SaveDialog1->FileName;
        StatusBar1->Panels->Items[0]->Text = OpenDialog1->FileName;
        Mess("Файл "+SaveDialog1->FileName+" успешно сохранен.");
    }
    delete list;
}
// Метод рисует графики
void __fastcall TForm1::ToolButton5Click(TObject *Sender)
{
    float x,y, precision = 0.05,x1=0.0,x2=0.0;
    int i = 0;
    i = 1;
    if (StringGrid1->RowCount<3) return;
    Chart1->Series[1]->Clear();
    Chart1->Series[0]->Clear();
    Chart1->Series[2]->Clear();
    Chart1->Series[3]->Clear();
}

```

```

x1 = StrToInt(StringGrid1->Cells[0][1]);
x2 = x1;
while((i<=StringGrid1->RowCount) && (!StringGrid1->Cells[0][i].IsEmpty()) && (!StringGrid1->Cells[1][i].IsEmpty()))
{
    x = StrToInt(StringGrid1->Cells[0][i]);
    if (x1>x) x1 = x;
    if (x2<x) x2 = x;
    y = StrToInt(StringGrid1->Cells[1][i]);
    if (CheckBox3->Checked) Chart1->Series[1]->AddXY(x, ConvertMkvToIntDb(y/1000));
    i++;
}
x1 = 0.0;
for (x=x1;x<x2;x+=precision)
{
    if (CheckBox1->Checked) Chart1->Series[0]->AddXY(x, GetValueFromNorm(x));
    // if ((CheckBox2->Checked) && (OptimalFilter!=NULL)) Chart1->Series[2]->AddXY(x, getFilterValue(OptimalFilter,x));
    // if ((CheckBox4->Checked) && (OptimalFilter!=NULL)) Chart1->Series[3]->AddXY(x, (ConvertMkvToIntDb(y/1000) - getFilterValue(OptimalFilter, x)));
    //Mess(">> " +FloatToStr(x) + " -> " +FloatToStr(getFilterValue(OptimalFilter, x)));
    }
    Mess("График построен.");
}
// Метод добавляет информацию о диапазоне
void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject *Sender)
{
    if (StrToInt(Edit1->Text)<0.15) Edit1->Text = "0,15";
    if (StrToInt(Edit2->Text)>30.0) Edit2->Text = "30,0";
    if (CheckBox1->Checked) DrawChartFromNorm(StrToInt(Edit1->Text), StrToInt(Edit2->Text));
}
void __fastcall TForm1::N2Click(TObject *Sender)
{
    ToolButton1Click(Sender);
}
void __fastcall TForm1::N3Click(TObject *Sender)
{
    ToolButton2Click(Sender);
}
void __fastcall TForm1::N4Click(TObject *Sender)
{
    ToolButton3Click(Sender);
}
void __fastcall TForm1::N8Click(TObject *Sender)
{
    ToolButton5Click(Sender);
}
void __fastcall TForm1::N11Click(TObject *Sender)
{
    ShowMessage("Программа создана для расчета...");
}
void __fastcall TForm1::StringGrid1KeyPress(TObject *Sender, char &Key)
{

```

```

    if (Key == VK_RETURN) StringGrid1->RowCount++;
}
void __fastcall TForm1::StringGrid1SelectCell(TObject *Sender, int ACol,
                                              int ARow, bool &CanSelect)
{
    select_row = ARow;
}
// Метод делает рассчет и поиск оптимального фильтра
void __fastcall TForm1::ToolButton6Click(TObject *Sender)
{
    float x,y;
    int i = 0, count = 0;
    bool flag = false;
    TFloatList* OverLevel = new TFloatList();
    float *Arr;
    if (StringGrid1->RowCount<3) {
        Mess("Введите начальные данные");
        ShowMessage("Введите начальные данные");
        return;
    }
    i = 1;
    String str;
    while((i<=StringGrid1->RowCount) && (!StringGrid1->Cells[0][i].IsEmpty()) && (!StringGrid1->Cells[1][i].IsEmpty()))
    {
        x = StrToFloat(StringGrid1->Cells[0][i]);
        y = StrToFloat(StringGrid1->Cells[1][i]);
        if ((ConvertMkvToIntDb(y/1000)>GetValueFromNorm(x)) && (flag == false))
        {
            flag = true;
            OverLevel->add(x,x);
        }
        if ((ConvertMkvToIntDb(y/1000)<GetValueFromNorm(x)) && (flag == true))
        {
            flag = false;
            OverLevel->setY(x);
        }
        i++;
    }
    count = OverLevel->getCount();
    if (count>0)
    {
        i = 0;
        while(i<count)
        {
            if (Arr = OverLevel->getArr(i)) Mess(" Диапазон превищения
допустимого уровня: f = "+FloatToStr(Arr[0])+".." +FloatToStr(Arr[1]));
            i++;
        }
    }
    delete OverLevel;
    Mess("Расчет произведен.");
}
void __fastcall TForm1::N7Click(TObject *Sender)
{
    ToolButton6Click(Sender);
}

```

Unit1.h – класс TForm1, подключение библиотек;

```

//-----

#ifndef Unit1H
#define Unit1H
//-----

#include <Classes.hpp> // базовые классы для создания элементов
пользовательского интерфейса (UI)
#include <Controls.hpp> // базовые классы для создания элементов
пользовательского интерфейса (UI)
#include <StdCtrls.hpp> // базовые классы для создания элементов
пользовательского интерфейса (UI)
#include <Forms.hpp> // базовые классы для создания элементов
пользовательского интерфейса (UI)
#include <ExtCtrls.hpp> // компоненты для работы с панелями, группами и
т. д.
#include <Menus.hpp> // классы для создания меню.
#include <ComCtrls.hpp> // дополнительные элементы управления (статусы,
панели и пр.).
#include <Chart.hpp> // компоненты для создания графиков.
#include <TeEngine.hpp> // компоненты для создания графиков.
#include <TeeProcs.hpp> // компоненты для создания графиков.
#include <Grids.hpp> // классы для работы с таблицами.
#include <Dialogs.hpp> // компоненты для работы с диалогами (например,
открытие и сохранение файлов).
#include <ToolWin.hpp> // панели инструментов.
#include <ImgList.hpp> // списки изображений.
#include <Series.hpp> // данные и стили для графиков.
#include <Math.hpp> // математические функции и константы.
//-----

class TFLOATLIST
{
private:
    float Arr[2];
    TFLOATLIST* pNext;
    TFLOATLIST* pFirst;
public:
    TFLOATLIST(){
        pNext = NULL;
        pFirst = this;
    }
    void __fastcall add(float x, float y);
    TFLOATLIST* __fastcall getLast();
    float* __fastcall getArr(int index);
    int __fastcall getCount();
    void __fastcall setY(float y);
    TFLOATLIST* __fastcall getFirst();

};

// Создание нового элемента списка
void __fastcall TFLOATLIST::add(float x, float y)
{
    TFLOATLIST* Last = getLast();
    TFLOATLIST* Next = new TFLOATLIST();
    Last->pNext = Next;
    Next->pFirst = Last->pFirst;
    Last->Arr[0] = x;
}

```

```

    Last->Arr[1] = y;
};

// Метод возвращает указатель на последний элемент списка
TFloatList* __fastcall TFloatList::getLast()
{
    TFloatList* Current = this;
    while (Current->pNext != NULL)
    {
        Current = Current->pNext;
    }
    return Current;
}
// Метод возвращает массив значений элемента списка под номером index
float* __fastcall TFloatList::getArr(int index)
{
    TFloatList* Current;
    int i = 0;
    Current = this;
    while (Current->pNext)
    {
        if (i == index) return Current->Arr;
        Current = Current->pNext;
        i++;
    }
    return 0;
};
// Метод возвращает общее количество элементов списка
int __fastcall TFloatList::getCount()
{
    int i = 0;
    TFloatList* Current;
    Current = pFirst;
    while (Current->pNext != NULL)
    {
        Current = Current->pNext;
        i++;
    }
    return i;
}
// Метод устанавливает второй элемент массива, текущего элемента списка
void __fastcall TFloatList::setY(float y)
{
    Arr[1] = y;
};

// Метод возвращает указатель на первый элемент списка
TFloatList* __fastcall TFloatList::getFirst()
{
    return pFirst;
}

class TForm1 : public TForm
{
__published:    // IDE-managed Components
    TMainMenu *MainMenu1;
    TPanel *Panel1;
    TMenuItem *N1;
    TMenuItem *N2;
}

```

```

TMenuItem *N3;
TMenuItem *N4;
TMenuItem *N5;
TGroupBox *GroupBox1;
TStatusBar *StatusBar1;
TGroupBox *GroupBox2;
TChart *Chart1;
TGroupBox *GroupBox3;
TLabel *Label1;
TLabel *Label2;
TEdit *Edit1;
TEdit *Edit2;
 TStringGrid *StringGrid1;
TOpenDialog *OpenDialog1;
TSaveDialog *SaveDialog1;
TToolBar *ToolBar1;
TToolButton *ToolButton1;
TToolButton *ToolButton2;
TToolButton *ToolButton3;
TToolButton *ToolButton4;
TToolButton *ToolButton5;
TImageList *ImageList1;
TToolButton *ToolButton6;
TLineSeries *Series1;
TLineSeries *Series2;
TButton *Button1;
TMenuItem *N6;
TMenuItem *N7;
TMenuItem *N8;
TMenuItem *N9;
TMenuItem *N10;
TMenuItem *N11;
TMemo *Memo1;
TCheckBox *CheckBox1;
TCheckBox *CheckBox3;
TLineSeries *Series3;
TLineSeries *Series4;
void __fastcall FormCreate(TObject *Sender);
void __fastcall FormResize(TObject *Sender);
void __fastcall N5Click(TObject *Sender);
void __fastcall ToolButton1Click(TObject *Sender);
void __fastcall ToolButton2Click(TObject *Sender);
void __fastcall ToolButton3Click(TObject *Sender);
void __fastcall ToolButton5Click(TObject *Sender);
void __fastcall Button1Click(TObject *Sender);
void __fastcall N2Click(TObject *Sender);
void __fastcall N3Click(TObject *Sender);
void __fastcall N4Click(TObject *Sender);
void __fastcall N8Click(TObject *Sender);
void __fastcall N11Click(TObject *Sender);
void __fastcall StringGrid1KeyPress(TObject *Sender, char &Key);
void __fastcall StringGrid1SelectCell(TObject *Sender, int ACol,
                                     int ARow, bool &CanSelect);
void __fastcall ToolButton6Click(TObject *Sender);
void __fastcall N7Click(TObject *Sender);
private: // User declarations
public: // User declarations
__fastcall TForm1(TComponent* Owner);

```

```

void __fastcall Resizer();
float __fastcall GetValueFromList(String str, int cell);
float __fastcall GetValueFromNorm(float f);
float __fastcall ConvertMkvIntoDb(float x);
void __fastcall DrawChartFromNorm(float x1, float x2);
void __fastcall Mess(String str);
void __fastcall FindOptimalFilter(TFloatList* Emision);
TFloatList** __fastcall getFilterList();
TFloatList* __fastcall getFilterValue(AnsiString FName);
float __fastcall overSignalAFC(TFloatList* Signal, TFloatList* Filter);
float __fastcall getFilterValue(TFloatList* Filter, float x);
TFloatList* __fastcall getListFromStringGrid();
float __fastcall fabs(float x);
};

//-----
-----
extern PACKAGE TForm1 *Form1;
//-----
-----
#endif

```

FloatList.h – класс для работы со связанными списками.

```

#ifndef FloatListLib
#define FloatListLib

class TFloatList
{
private:
    float Arr[2];
    TFloatList* pNext;
    TFloatList* pFirst;
public:
    TFloatList(){
        pNext = NULL;
        pFirst = this;
    }

    void __fastcall add(float x, float y);
    TFloatList* __fastcall getLast();
    float* __fastcall getArr(int index);
    int __fastcall getCount();
    void __fastcall setY(float y);
    TFloatList* __fastcall getFirst();

};

// Создание нового элемента списка
void __fastcall TFloatList::add(float x, float y)
{
    TFloatList* Last = getLast();
    TFloatList* Next = new TFloatList();
    Last->pNext = Next;
    Next->pFirst = Last->pFirst;
    Last->Arr[0] = x;
    Last->Arr[1] = y;
}

```

```

};

// Метод возвращает указатель на последний элемент списка
TFloatList* __fastcall TFloatList::getLast()
{
    TFloatList* Current = this;
    while(Current->pNext!=NULL)
    {
        Current = Current->pNext;
    }
    return Current;
}
// Метод возвращает массив значений элемента списка под номером index
float* __fastcall TFloatList::getArr(int index)
{
    TFloatList* Current;
    int i = 0;
    Current = this;
    while (Current->pNext)
    {
        if (i == index) return Current->Arr;
        Current = Current->pNext;
        i++;
    }
    return 0;
};
// Метод возвращает общее количество элементов списка
int __fastcall TFloatList::getCount()
{
    int i = 0;
    TFloatList* Current;
    Current = pFirst;
    while (Current->pNext != NULL)
    {
        Current = Current->pNext;
        i++;
    }
    return i;
}
// Метод устанавливает второй элемент массива, текущего элемента списка
void __fastcall TFloatList::setY(float y)

{
    Arr[1] = y;
}
// Метод возвращает указатель на первый элемент списка
TFloatList* __fastcall TFloatList::getFirst()
{
    return pFirst;
}

#endif

```

Приложение Г.

Акты внедрения



МИНИСТЕРСТВО КУЛЬТУРЫ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
 ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
 УЧРЕЖДЕНИЕ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ «ШАХТЁРСКИЙ КОЛЛЕДЖ КИНО И
 ТЕЛЕВИДЕНИЯ ИМЕНИ А.А. ХАНЖОНКОВА»
 (ГБПОУ ДНР «ШКК и ТВ ИМ. А.А. ХАНЖОНКОВА»)
 ул. Суворова, 46, г. Шахтёрск, ДНР, 286211, тел. (856) 4-31-41
 e-mail: cinemaskt@mail.ru ОГРН 1229300058679

от 02.12.2024 г. № 725/1

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы в учебном процессе
 ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
 УЧЕРЕЖДЕНИЯ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ "ШАХТЁРСКИЙ КОЛЛЕДЖ
 КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ ИМЕНИ А.А. ХАНЖОНКОВА"

Мы, которые ниже подписались, директор Хроленок Ж.А., заместитель директора по учебной работе Лозовская Т.П., методист Шепелева И.А. составили данный акт о том, что результаты диссертационной работы Чупахина Александра Сергеевича «Математическое моделирование и обоснование параметров оборудования, создающего электромагнитное поле в киноконцертных комплексах» используются в учебном процессе ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧЕРЕЖДЕНИЯ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ "ШАХТЁРСКИЙ КОЛЛЕДЖ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ ИМЕНИ А.А. ХАНЖОНКОВА" по специальностям: 11.02.05 «Аудиовизуальная техника», 55.02.01 «Театральная и аудиовизуальная техника (по видам)»

Вид результата, который внедряется	Форма внедрения	Эффект от внедрения
1. Обеспечение электромагнитной совместимости при монтаже проекционного, звукотехнического и вспомогательного оборудования аудиовизуальных комплексов	В рабочей программе профессионального модуля ПМ.01 «Монтаж, пуск и наладка проекционного, звукотехнического и вспомогательного оборудования аудиовизуальных комплексов» по специальности 11.02.05 «Аудиовизуальная техника». В рабочей программе междисциплинарного курса МДК.01.01 «Проектирование и компьютерное моделирование зрелищных мероприятий» по специальности 55.02.01 «Театральная и аудиовизуальная техника (по видам)».	Усовершенствование рабочих программ подготовки специалистов
2. Алгоритмы и программы анализа электромагнитной обстановки, создаваемой кинотехнологическим и звукотехническим оборудованием в кондуктивной среде и окружающем пространстве	В профессиональных модулях в соответствующих разделах введена информация, по прогнозированию создаваемых источниками электропитания электромагнитных помех и средств их подавления, разработаны новые лабораторные работы по моделированию электромагнитной обстановки в киноконцертном комплексе.	Повышение качества практической подготовки специалистов

Директор

Ж. А. Хроленок

Заместитель директора
по учебной работе

Т.П. Лозовская

Методист

И.А. Шепелева





143360, Московская область, г.О. Наро-Фоминский район, г.

Апрелевка, ул. Островского, дом 38, пом. 3
8 (977) 874-51-80 tekh_lab@mail.ru

ОГРН: 1205000110776; ИНН: 5032323892; КПП: 503001001

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Чупахина Александра Сергеевича

на тему: «Математическое моделирование и обоснование параметров оборудования, создающего электромагнитное поле в киноконцертных комплексах»

31 июля 2023 г.

Комиссия в составе:

Э.О. Капустина – генеральный директор ООО «ТехЛаб», председатель комиссии;
М.А. Капустин – инженер проекта, член комиссии

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Математическое моделирование и обоснование параметров оборудования, создающего электромагнитное поле в киноконцертных комплексах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в деятельности ООО «ТехЛаб» при проектировании кинотеатра "КиноМир" в ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ УЧРЕЖДЕНИИ "ШАХТЁРСКИЙ КОЛЛЕДЖ КИНО И ТЕЛЕВИДЕНИЯ ИМЕНИ А.А. ХАНЖОНКОВА" по адресу: г. Шахтерск, ул. Суворова 46, в виде:

1. Программного обеспечения, предназначенного для прогнозирования электромагнитной обстановки в функционально насыщенных помещениях киноконцертного комплекса.

2. Научно-практических рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости в функционально-насыщенных помещениях киноконцертного комплекса.

Использование указанных материалов позволяет: спрогнозировать благоприятную электромагнитную обстановку, усовершенствовать процесс проектирования и оснащения функционально-насыщенных помещений в аспекте электромагнитной совместимости.

Результаты разработки и научно-практические рекомендации диссертации также планируется использовать в будущих проектах ООО «ТехЛаб» при проектировании новых и реконструкции действующих культурно-зрелищных объектов.

Председатель комиссии



Э.О. Капустина

Член комиссии

М.А. Капустин

Общество с ограниченной ответственностью «ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ»
 (ООО «ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ»)
 299038, г.Севастополь, ВН.ТЕР.Г. ГАГАРИНСКИЙ МУНИЦИПАЛЬНЫЙ ОКРУГ, УЛ
 КОЛОБОВА, Д. 34/1, ПОМЕЩ. XV, ОФ. 16, тел. +7 9885480742
 ИНН 9200018019 КПП 920001001 ОГРН 1239200003646

от «23 » апреля 2024 г. № 4

АКТ
 внедрения результатов диссертационной работы
 Чупахина Александра Сергеевича

Результаты диссертационной работы Чупахина Александра Сергеевича на тему: «Математическое моделирование и обоснование параметров оборудования, создающего электромагнитное поле в киноконцертных комплексах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены и используются в деятельности Общества с ограниченной ответственностью «ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ» при проектировании и техническом оснащении культурно-зрелищных объектов, в виде:

1. программного обеспечения для анализа помех, создаваемых источниками вторичного электропитания в кондуктивной среде с целью представления рекомендаций для рационального выбора помехоподавляющих фильтров, обеспечивающих электромагнитную совместимость импульсных источников электропитания с энергетической сетью и чувствительной электронной аппаратурой;
2. программного обеспечения, предназначенного для прогнозирования электромагнитной обстановки в функционально насыщенных помещениях;
3. практических рекомендаций по обеспечению электромагнитной совместимости в функционально-насыщенных помещениях киноконцертного комплекса.

Использование указанного программного обеспечения и материалов позволило сформировать электромагнитные портреты сложной электромагнитной обстановки и обосновать рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости в контролируемой зоне на территории культурно-зрелищных объектов. Внедрение пакетов компьютерных программ и практических рекомендаций, в совокупности, повысили качество исполнения работ на объектах ООО «ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ».

Результаты разработки и научно-практические рекомендации диссертации также планируется использовать в будущих проектах ООО «ЧЕРНОМОРСПЕЦСТРОЙ» при проектировании новых и реконструкции действующих культурно-зрелищных объектов.

Генеральный директор
 М.П.

Ползунов Дмитрий Вячеславович

