

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)

АВТОРЕФРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ПАВЛЫШ Владимир Николаевич
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк), заведующий кафедрой «Прикладная математика и искусственный интеллект»
- Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ТАРАСОВ Вениамин Николаевич
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (г. Самара), заведующий кафедрой «Управление в технических системах»
- кандидат технических наук
ШЕВЧУК Оксана Александровна
ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (г. Макеевка), доцент кафедры «Специализированные информационные технологии и системы»
- Ведущая организация: ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ» (г. Донецк)

Защита состоится «22» мая 2025 г. в 13.30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.491.03 при ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, аудитория 1.203.

Тел./факс: +7(856) 301-07-69, e-mail: donntu.info@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ДонНТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус и на сайте <http://donntu.ru>

Автореферат разослан « » марта 2025 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета 24.2.491.03
доктор технических наук, профессор



А.О. Новиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 рецептор ЭМП относительно электромагнитных воздействий других устройств. Технические устройства киноконцертного комплекса работают совместно. Каждый рецептор находится под общим электромагнитным воздействием ряда других устройств. Совокупность одновременно существующих электромагнитных воздействий на рецептор 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-Slavske).

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 наукометрические 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы. Обоснована актуальность темы, сформулирована цель и поставлены задачи исследований, охарактеризованы: научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность результатов работы, приведены сведения об апробации.

В первом разделе «Анализ применяемых способов обеспечения электромагнитной совместимости оборудования киноконцертных залов. Цель и задачи исследования» проведен анализ состояния вопроса. Показано, что до настоящего времени не выполнены работы по комплексному исследованию электромагнитной обстановки (ЭМО), 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. В результате обоснованы цель и задачи исследования.

Во **втором разделе** «Математическое моделирование процесса формирования электромагнитного поля с учётом параметров механических возмущений» выполнен анализ источников и типов механических возмущений, влияющих на электромагнитное поле.

Рассмотрены характеристики процесса эмиссии электромагнитного поля вибрирующим стержнем из металла неферромагнитной группы.

На рисунке 1 представлен бесконечный стержень кругового поперечного сечения в прямоугольной (правосторонней декартовой) (x_1, x_2, x_3) и цилиндрической (ρ, ϕ, z) системах координат в задаче об излучении низкочастотного электромагнитного поля.

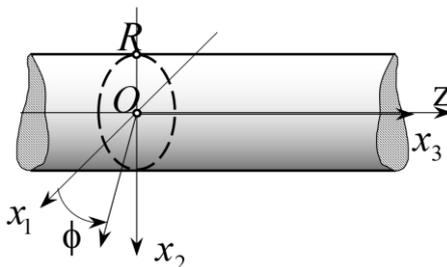


Рисунок 1 – Стержень с круговым поперечным сечением

Амплитудное значение $J_k(\rho, \phi, z)$ k -го компонента вектора плотности вихревых токов определяют:

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

где ε_{kmn} – компонент тензора Леви-Чивиты, который равен +1, когда индексы k , m и n образуют четное число беспорядков в перестановках чисел 1, 2 и 3, т. е. образуют комбинации 123; 231; 312; и -1, когда индексы k , m и n образуют нечетное число беспорядков в перестановках чисел 1, 2 и 3, т. е. образуют комбинации 132; 321; 213; компонент тензора Леви-Чивиты равен нулю, когда любые два из трех индексов равны между собой.

Дифференциальное уравнение для определения характеристик поля рассеяния:

$$\text{rot rot } \vec{H}^B - k_0^2 \vec{H}^B = 0, \quad (1)$$

где $k_0 = \omega/c_0$ – волновое число электромагнитных колебаний в вакууме; $c_0 = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ – скорость распространения электромагнитных волн в пустоте.

Решения уравнения (1) должны удовлетворять условиям физической реализуемости источника поля:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} \left\{ \vec{H}^B, \frac{\partial \vec{H}^B}{\partial \rho}, \frac{\partial \vec{H}^B}{\partial \phi}, \frac{\partial \vec{H}^B}{\partial z} \right\} = 0, \quad (2)$$

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:

$$\left[H_{\beta}(\rho, \phi, z) - H_{\beta}^B(\rho, \phi, z) \right]_{\rho=R} = 0, \quad \beta = \rho; \phi; z. \quad (3)$$

На рисунке 2 приведены результаты расчетов коэффициентов B_1 и B_2 .

На рисунке 3 показано распределение в пространстве компонентов вектора напряженности магнитной составляющей низкочастотного электромагнитного поля $H_{\beta}^B(\rho)$.

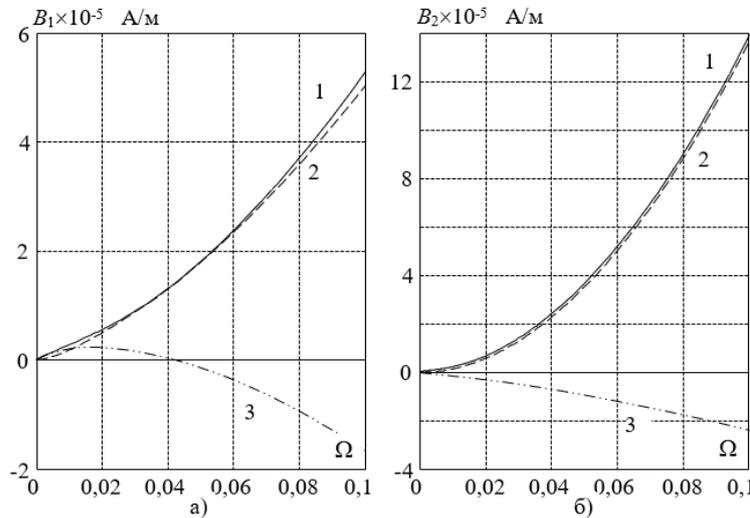


Рисунок 2 – Результаты расчетов коэффициентов B_1 (а) и B_2 (б)

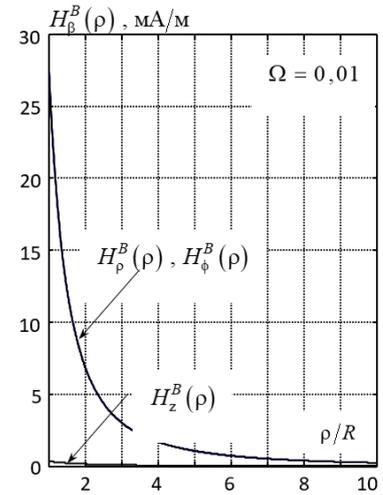


Рисунок 3 – Распределение компонентов вектора напряженности магнитного поля

Таким образом, получены характеристики поля, создаваемого за счет вибрации стержня из металла неферромагнитной группы.

Далее рассмотрен процесс формирования электромагнитного поля вибрирующим диском.

На рисунке 4 показана расчетная схема для диска (позиция 1) 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.

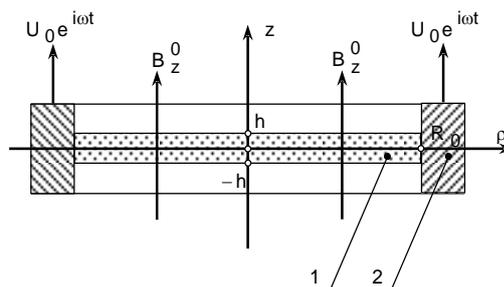


Рисунок 4 – Расчетная схема задачи о колебаниях ферромагнитного диска

Уравнение процесса имеет вид:

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

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 записывается в виде:

$$w(\rho) = AJ_0(\lambda\rho) + BI_0(\lambda\rho), \quad (5)$$

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 4 конструкции общее решение (5) должно удовлетворять граничным условиям:

$$w(R_0) = U_0, \quad \left. \frac{\partial w(\rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=R_0} = 0. \quad (6)$$

Тогда общее решение уравнения принимает вид:

$$w(\rho) = U_0 \frac{I_1(\lambda R_0)}{D(\lambda R_0)} \left[J_0(\lambda\rho) + I_0(\lambda\rho) \frac{J_1(\lambda R_0)}{I_1(\lambda R_0)} \right], \quad (7)$$

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.

На рисунке 5 приведено схематическое изображение ферромагнитного диска в декартовой и сферической системе координат.

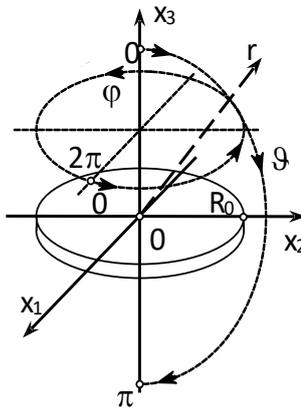


Рисунок 5 – Декартовая и сферическая системы координат

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.

$$\text{rot rot } \vec{H}^e - \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \vec{H}^e = 0. \quad (8)$$

На частотах звукового диапазона $\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \ll 1$, и уравнение (8) принимает

вид:

$$\text{rot rot } \vec{H}^e = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) целесообразно выполнить в сферической системе координат (рисунок 5).

Рассмотрено практическое применение результатов расчета на простейшем модельном примере плоского печатного проводника кольцевой формы, который располагается соосно над ферромагнитным диском (рисунок 6).

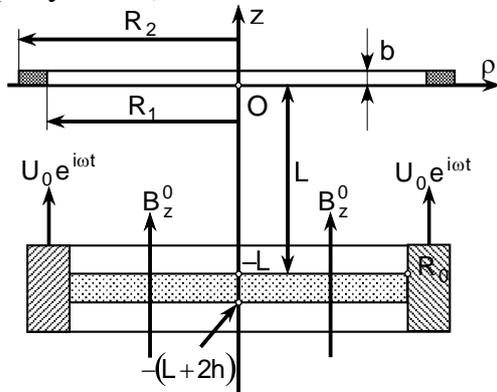


Рисунок 6 – Расчетная схема определения электродвижущей силы в кольцевом печатном проводнике

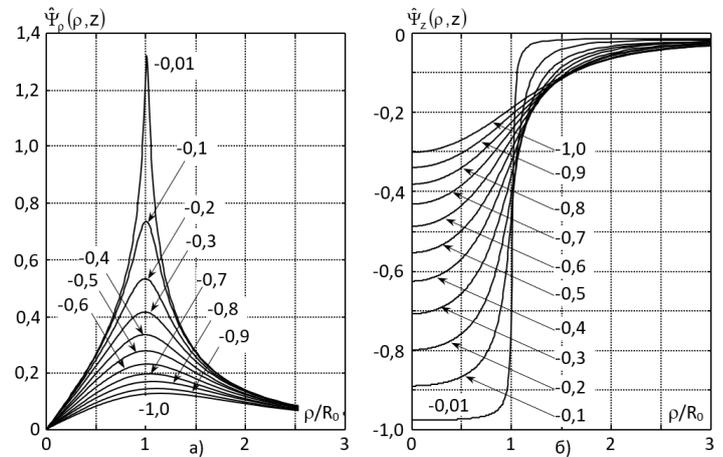


Рисунок 7 – Изменение функций $\hat{\Psi}_\rho(\rho, z)$ и $\hat{\Psi}_z(\rho, z)$ в ближайшей окрестности кольцевого печатного проводника

На рисунке 7 показаны результаты вычислений нормированных значений функций $\hat{\Psi}_\rho(\rho, z) = 2R_0\Psi_\rho(\rho, z)$ (рисунок 7а) и $\hat{\Psi}_z(\rho, z) = 2R_0\Psi_z(\rho, z)$ (рисунок 7б) в ближайшей окрестности плоского печатного проводника с безразмерными геометрическими параметрами $r_1 = 1$; $r_2 = 1,02$ и $\beta = 0,01$.

Как следует из полученных 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, которая генерируется на высокочастотных резонансах, убывают быстрее при увеличении расстояния.

В третьем разделе «Математическое моделирование процесса формирования электромагнитной обстановки с учетом влияния параметров функционирующих радиоэлектронных устройств киноконцертного комплекса» выполнен анализ электромагнитной обстановки в помещении аппаратной с помощью разработанной прикладной программы для оценки

уровней электромагнитного поля с возможностью визуализации прогнозируемой электромагнитной обстановки.

Экспликация основного и вспомогательного оборудования (таблица 1) в аппаратной представлена на рисунке 8.

Таблица 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)

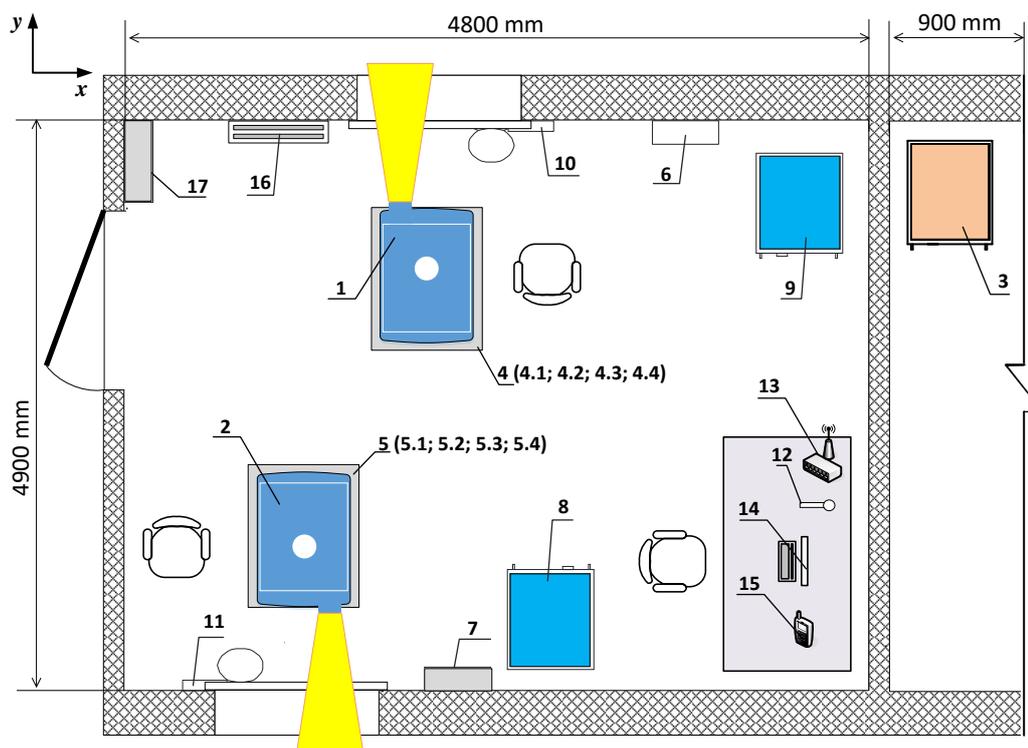


Рисунок 8 – Общий план аппаратной киноконцертного зала (вид сверху) с экспликацией оборудования

Блок-схема алгоритма программы моделирования электромагнитной обстановки в киноконцертном комплексе представлена на рисунке 9. 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.

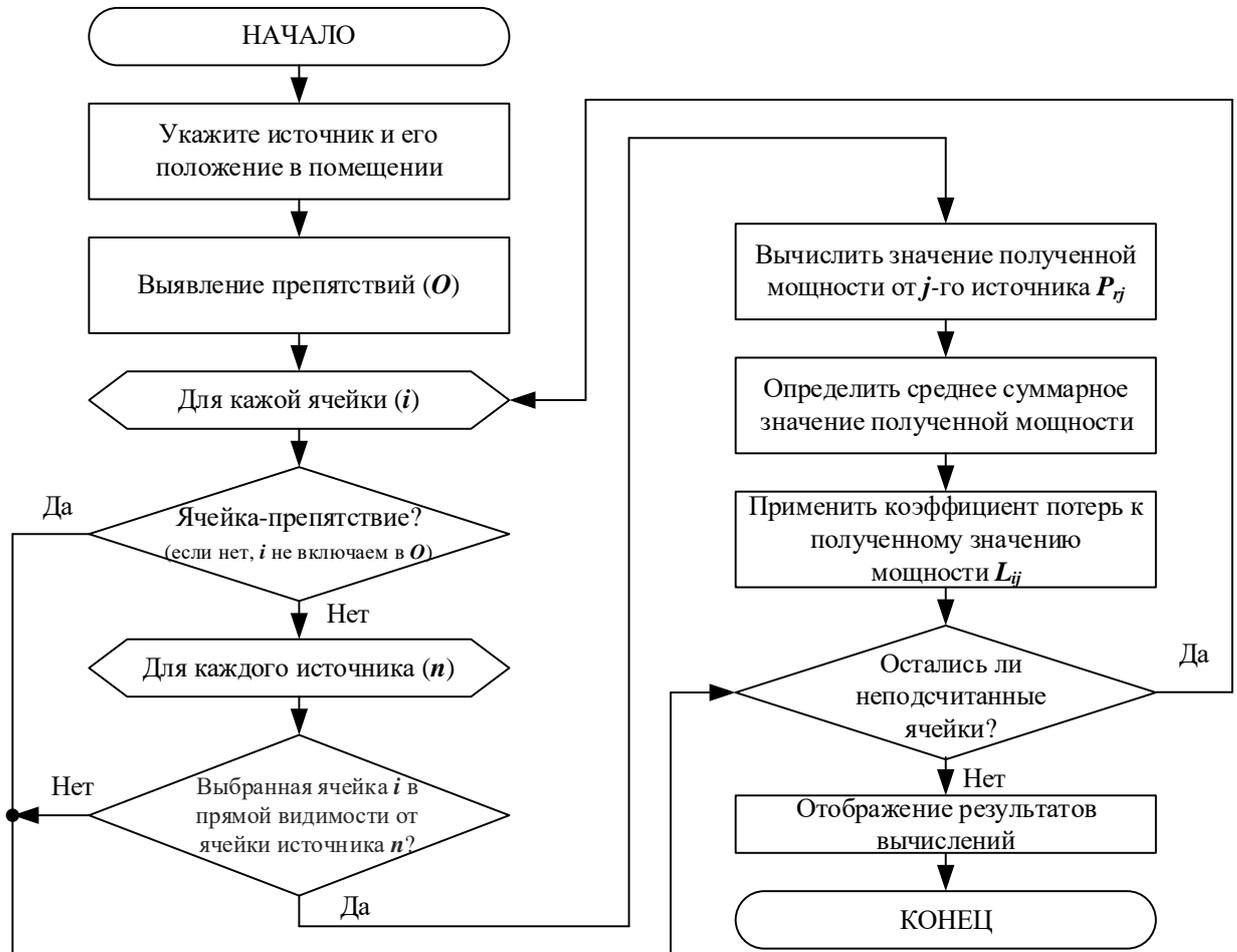
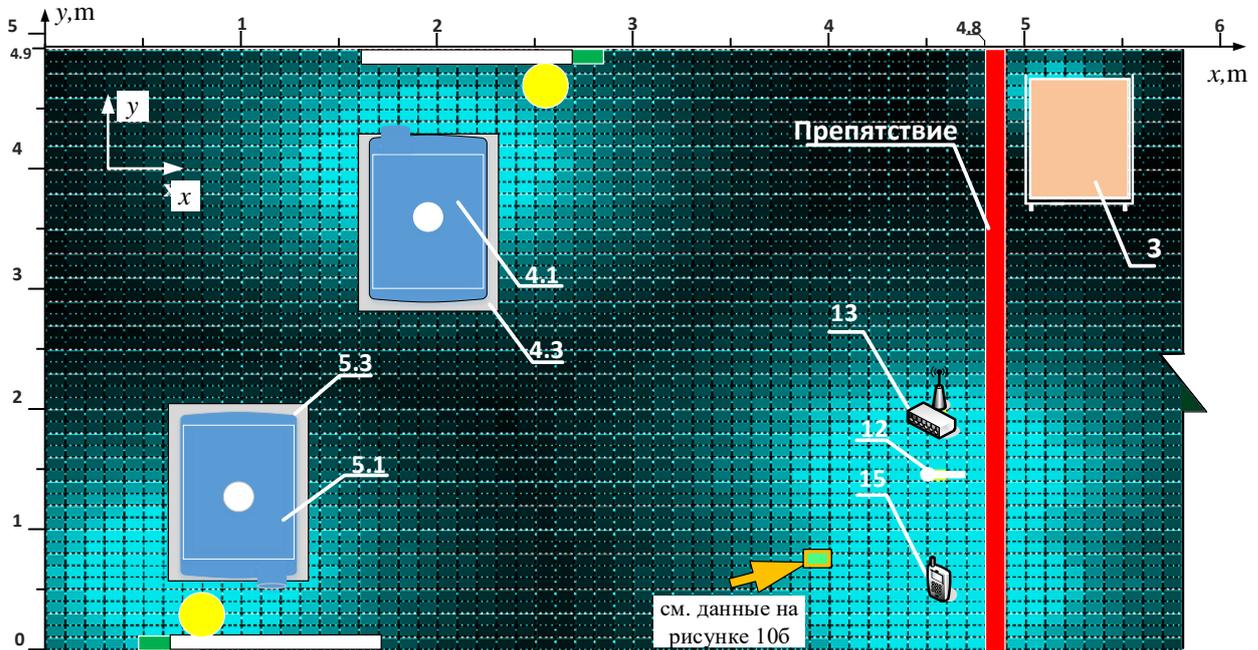


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма моделирования электромагнитной обстановки в киноконцертном комплексе

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 10) и предоставляет информацию о влиянии каждого источника в отдельности (рисунок 11).

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

На рисунке 10а представлены результаты моделирования ЭМИ в аппаратной площадке 27,9 м², показанной на рисунке 8. 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 10б).

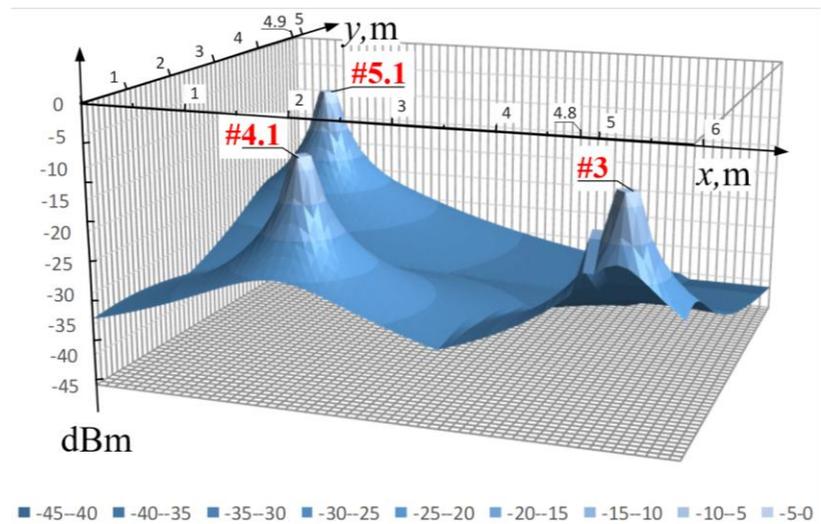


а)

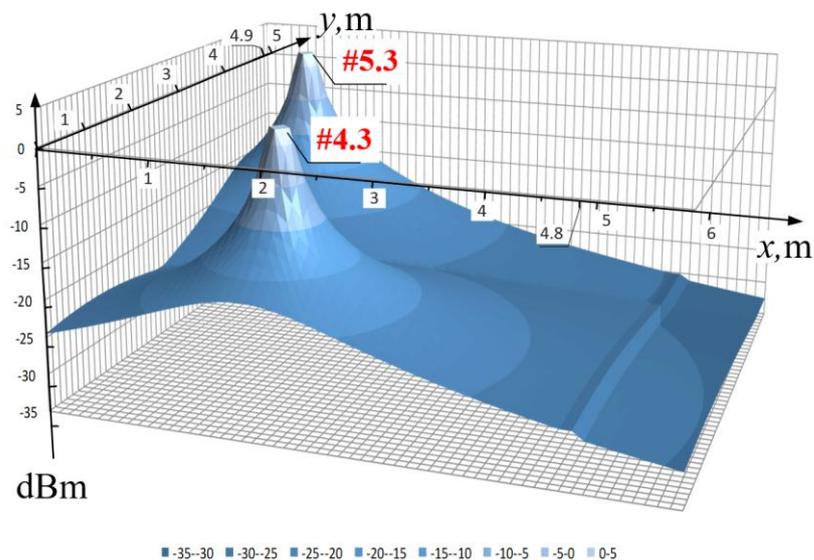
- | | | |
|----|--------------------------|-----------|
| 1. | Cellphone: | -24 dBm |
| 2. | DVB-T Receiver 1: | -25.4 dBm |
| 3. | DVB-T Receiver 2: | -26.2 dBm |
| 4. | Wireless Microphone: | -26.5 dBm |
| 5. | Wi-Fi Router: | -30.2 dBm |
| 6. | Digital Cinema Server 2: | -35.8 dBm |
| 7. | Digital Cinema Server 1: | -36 dBm |
| 8. | Office Server: | -39.4 dBm |

б)

Рисунок 10 – Результаты моделирования ЭМО в аппаратной
 (а) проекция рассчитанных уровней ЭМП на план аппаратной; (б) список источников, где в порядке убывания представлен результат рассчитанного индивидуального воздействия для выбранной элементарной ячейки



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



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

Рисунок 11 – Результаты моделирования ЭМО в аппаратной

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.

Проведенное сравнение результатов моделирования, полученных с помощью предложенной прикладной программы, с результатами экспериментальных измерений в конкретных помещениях показывает, что результаты достаточно хорошо согласуются, расхождение составляет от 2 до 15%, что свидетельствует о работоспособности программы и возможности ее практического применения.

В четвертом разделе «Комплексная реализация результатов решения задач обеспечения регламентируемых значений параметров электромагнитной

обстановки в киноконцертном зале и рекомендации по их практическому применению» представлены практические рекомендации по улучшению ЭМО в киноконцертном комплексе.

С целью определения условий по обеспечению электромагнитной совместимости электрической сети и функциональной аудиовизуальной аппаратуры разработан алгоритм и программа анализа ЭМО, которую создают источники вторичного электропитания в кондуктивной среде. На рисунке 12 приведен упрощенный вариант алгоритма.

В результате получены данные, характеризующие электромагнитную обстановку для определения условий обеспечения электромагнитной совместимости и, при необходимости, применения помехоподавляющих фильтров и экранирующих конструкций.

Программа обрабатывает данные, полученные после исследования электромагнитной обстановки, формируемой источниками вторичного электропитания (ИВЭП), и сравнивает их с нормативными допустимыми значениями уровней электромагнитных помех. После проведения анализа, в случае превышения допустимого уровня помех ИВЭП, приведены рекомендации, относительно необходимости применения дополнительных средств защиты. Из базы данных фильтров программа выбирает фильтр, удовлетворяющий условиям энергообеспечения и электромагнитной совместимости.

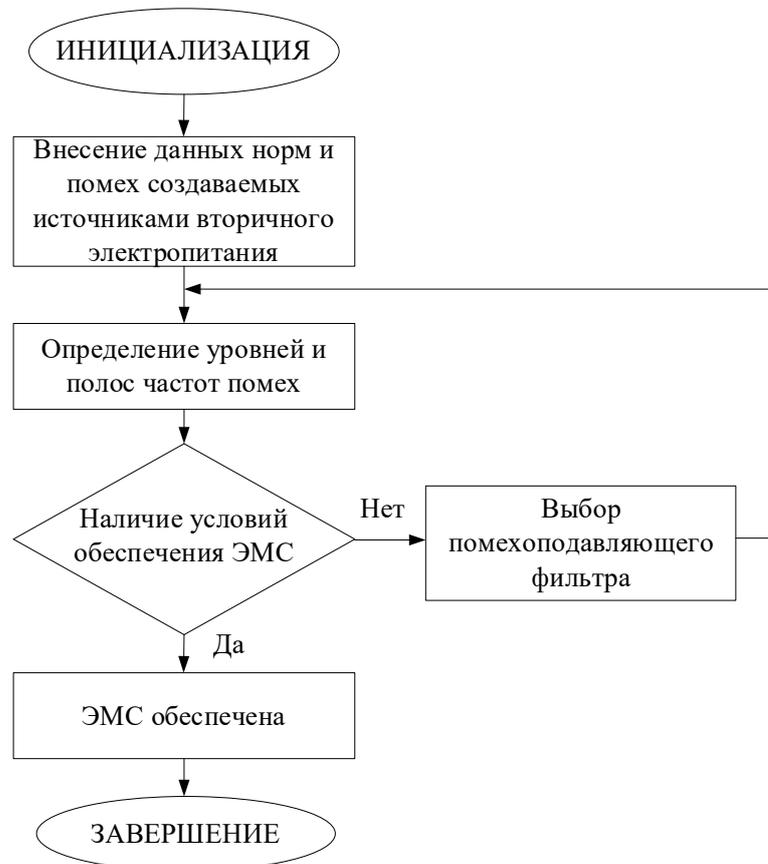


Рисунок 12 – Алгоритм программы анализа электромагнитной обстановки, которую создают ИВЭП в кондуктивной среде

Выполнен расчет для демонстрации методологии проектирования коммутирующих усилителей с использованием резонансной полумостовой топологии, который включает пять шагов.

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.

Результаты, полученные с использованием предложенного алгоритма, позволят выполнить эффективное экранирование при проектировании надежных и устойчивых к электромагнитным воздействиям защитных конструкций.

В приложениях приведены тексты программ и акты внедрения результатов диссертационной работы.

Перспективы дальнейших разработок по рассматриваемой тематике состоит в:

– создании замкнутой автоматизированной системы анализа электромагнитной обстановки в помещениях киноконцертного комплекса, способной в режиме реального времени выполнять мониторинг параметров электромагнитного поля, выявлять отклонения от нормативных требований и адаптировать работу оборудования с целью обеспечения электромагнитной совместимости;

– разработке интеллектуальных сетевых помехоподавляющих фильтров с беспроводным интерфейсом и распределенной обработкой данных в режиме реального времени для улучшения работы звукотехнического оборудования.

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 находятся 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. Дана оценка числовых значений напряженности эмитируемого 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 аппаратном помещении 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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук в РФ:

1. 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. – DOI 10.24412/2413-7383-2024-4-113-125.

2. Пилинский, В.В. Анализ допустимых регламентированных уровней эмиссии и чувствительности оборудования киноконцертного комплекса / В.В. Пилинский, **А.С. Чупахин**, В.Б. Швайченко, А.А. Довженко // Технологии электромагнитной совместимости. – М.: ООО «Издательский дом «Технологии»». – 2015. – № 3 (54). – С.18–25. – ISSN 1729-2670.

Перечень работ, опубликованных в изданиях, входящих в базы цитирований Scopus

3. Pilinsky, V. Assessment of the Electromagnetic Environment in a Hardware Control Room on Cinema and Concert Hall / V. Pilinsky, A. Rozvadovskiy, **A. Chupakhin**, R. Sirota, I. Zaitsev – DOI: 10.1109/EMCEurope.2017.8094740 // Proc. of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE 2017), Angers, France, 4-8 September 2017. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8094740> (дата обращения: 15.12.2024).

4. 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**. – DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998107 // 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> (дата обращения: 15.12.2024).

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, рекомендуемых Министерством образования и науки Украины:

5. Аппаратно-программный комплекс проектирования гибридных помехоподавляющих фильтров / В.В. Пилинский, Д.В. Титков, В.Б. Швайченко, **А.С. Чупахин**, Осман Шарагда // Специальный выпуск «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит», Т.2 № 8(114). – 2013. – С. 195-200.

6. **Chupakhin A.**, Shield Current Induced Noise in Audio Cables // Специальный выпуск «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит», Т. 2 № 8(114). – 2013. – С. 211-213.

7. Чупахин, А.С. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 3. Расчет электромагнитных полей в функционально насыщенном помещении / **А.С. Чупахин**, В.В. Пилинский, В.Б. Швайченко // Техническая электродинамика. – Тематический выпуск «Силовая электроника и энергоэффективность», Тематический выпуск № 1. – 2012. – С. 135-140.

8. 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», Тематический выпуск № 4. – 2009. – С. 3-8.

9. Особенности обеспечения электромагнитной совместимости современного киноконцертного комплекса. Часть 1 – Основные регламентирующие документы / Пилинский В.В., Прядко А.М., Родионова М.В., **Чупахин А.С.**, Швайченко В.Б. // Техническая электродинамика. – Тематический выпуск «Проблемы современной электротехники», Тематический выпуск №6. – 2008. – С. 115-120.

Публикации по материалам конференций:

10. 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.

11. 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.

12. **Чупахин, А.С.** Применение программного комплекса Comsol Multiphysics для оценки электромагнитной обстановки киноконцертного комплекса // материалы международной научно-технической конференции: «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (8-12 сентября 2014 г.), г. Севастополь: Изд-во СевГУ, 2014. – С. 83-85.

13. Pilinsky, V. Algorithm of Simulation Electromagnetic Environment in Cinema and Concert Hall / V. Pilinsky, M. Rodionova, **О. Chupakhin**, J. Zozulenko // Proc. of the International Conference TCSET'2014 (Lviv-Slavske, February 25 – March 1) 2014. – P. 171-172.

14. Пилинский, В.В., Средства и мероприятия обеспечения электромагнитной совместимости в киноконцертном комплексе / В.В. Пилинский, **А.С. Чупахин**, Я.С. Зозуленко // Сборник докладов: I научно-практ. конференции «Современные технологии кино», (Шахтерск, 15-16 апреля 2013). – Шахтёрск: Изд-во ШКТ, – С. 139-147.

15. Method for placing and laying of structured cabling systems in electromagnetic compatibility aspect / **А. Chupakhin**, V. Pilinsky, S. Scripchenko, V. Shvaichenko // Electronics and nanotechnology proceedings of the XXXII International Scientific Conference ELNANO 2012 (Kyiv, 10-12 April 2012). – K.: NTUU «КПИ». - P. 131-132.

В публикациях, написанных в соавторстве, соискателю принадлежит: [1] – вычислительный алгоритм, реализованный в среде MATLAB, оценки эффективности защиты от электромагнитных полей в зависимости от параметров экранирующих материалов; [2] – результаты сравнительного анализа эмиссии и чувствительности кинотехнологического оборудования; [3, 13] – алгоритм и прикладная программа с возможностью визуализации прогнозируемой электромагнитной обстановки; [4] – метод определения низкочастотного шума в печатном проводнике; [5] – алгоритм, информационное обеспечение, позволяющее с учетом возможного диапазона отклонения параметров рационально выбирать производителя и тип помехоподавляющего фильтра с учетом путей распространения помех и требований к изделию в целом, результаты прогнозирования ЭМО в аппаратной киноконцертного комплекса; [7] – алгоритм комплексного анализа электромагнитной обстановки в закрытых помещениях; [8] – результаты измерений (in situ) электромагнитной обстановки в аппаратных помещениях киноконцертных комплексов; [9] – результаты сравнительного анализа характеристик комплекта оборудования и нормативной базы в аспекте обеспечения электромагнитной совместимости; [10] – сформирован пакет характеристик, для исследования состояния электромагнитных полей, создаваемых элементами аппаратуры киноконцертных залов; [11] – методика расчета резонансного контура и пиковых значений тока в силовых полупроводниковых ключах; [14] – результаты анализа средств и мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости в киноконцертном комплексе; [15] – анализ структурированных кабельных сетей в аспекте обеспечения электромагнитной совместимости.