

На правах рукописи

Козлов Андрей Владимирович

ПОДАВЛЕНИЕ ПАРАЗИТНЫХ РАДИОЧАСТОТНЫХ
КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМАХ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ТИПОВ

01.04.03 Радиофизика,

05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук

Саратов – 2010

Работа выполнена на кафедре прикладной физики Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского и в ООО НПФ «Этна»

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор
Давидович Михаил Владимирович
доктор физико-математических наук, профессор
Шаповалов Александр Степанович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Безручко Борис Петрович
доктор технических наук, профессор
Комаров Вячеслав Вячеславович

Ведущая организация: ОАО «Центральный НИИ измерительной аппаратуры» г. Саратов

Защита состоится 30 декабря 2010 года в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корпус, ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке СГУ

Автореферат разослан 29 ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин В.М.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Задачи минимизации паразитных колебаний, нелинейных искажений и их подавления остаются актуальными для различных радиофизических устройств в диапазоне от сверхнизких частот до СВЧ и КВЧ.

Достаточно отметить, что помехи в низкочастотной части радиодиапазона оказывают серьезное влияние на качество радио- и телекоммуникаций, сильно влияют на здоровье людей, наносят вред работе различных электротехнических изделий (например, помехи коммутационного происхождения в контактных сетях электротранспорта могут существенно отражаться на надежности и долговечности двигателей трамваев, троллейбусов и электровозов).

В этой связи разработка соответствующих математических моделей, методов экспериментальных исследований, позволяющих прогнозировать уровень генерируемых индустриальных радиопомех (ИРП) и побочных электромагнитных колебаний (ПЭМК), а также методов их снижения и подавления, представляется крайне важной задачей.

Проблеме электромагнитной совместимости (ЭМС) посвящено достаточно большое количество работ, имеющих как теоретический, так и прикладной характер. В частности, проведена классификация помех и исследовано их влияние на передачу сигналов и сообщений, подробно рассмотрены вопросы помехоустойчивости [Котельников В.А., Теория потенциальной помехоустойчивости, М.; Л.: Государственное энергетическое издательство, 1956] и эмиссии помех [Хабигер Э., Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. М., Энергоатомиздат, 1995]. Особое внимание в литературе уделено методам определения уровня паразитных колебаний [Дональд Р.Ж. Уайт, Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. М., Советское радио Т1-Т2, 1978], а также вопросам подавления помех, создаваемых радиоэлектронными и электротехническими устройствами [Отт Г., Методы подавления шумов и помех в электронных системах. Мир, 1979].

С целью борьбы с помехами практически с первых десятилетий появления и развития электротранспорта (в частности, горэлектротранспорта) были разработаны и внедрены реакторы помехоподавления (РП), выполняющие две функции. С одной стороны, они препятствовали попаданию спектра паразитных колебаний от двигателей подвижных средств электротранспорта в контактную сеть с возможностью излучения в эфир. Во-вторых, они затрудняли проникновение помех, возникающих за счет коммутационных процессов в контактной сети в электрические цепи самого трамвая, троллейбуса, электровоза.

Однако эти устройства традиционно выполнялись в виде массивных катушек индуктивности, выполненных из толстой и широкой алюминиевой, а

чаще – медной ленты, навиваемой в обкладке из своеобразного сердечника – тонкой ленты из электротехнической стали.

Поскольку РП включаются последовательно в силовоточные электрические цепи (для горэлектротранспорта – это сотни ампер, для железнодорожного транспорта – килоамперы), толщину и ширину ленты в существующих РП выбирают достаточно большой, что обуславливает большую массу и очень высокую стоимость этих устройств. Так РП для трамваев и троллейбусов имеют массу до 60 кг, причем основная (85÷90 %) часть этой массы приходится на дорогостоящую медную ленту. Для электропоездов масса используемых РП (также на основе медной ленты) достигает зачастую более 1 т.

В этой связи разработка математических моделей, позволяющих корректно рассчитывать РП, осуществлять их оптимизацию с целью снижения стоимости и габаритов, а также повышения качества, представляется технически важной. Не решенной здесь до конца проблемой является строгое полевое математическое моделирование соленоидов различной формы с магнитными и электромагнитными экранами, позволяющее существенно минимизировать массу и стоимость подобных устройств, получая при этом, как минимум, не худшие характеристики подавления паразитных колебаний. Для задач фильтрации важен корректный учет распределенных межвитковых емкостей в соленоиде.

Схожей проблемой является миниатюризация и улучшение качества при проектировании электронагревательных устройств (ЭНУ) среднего и высокого уровней мощности. К улучшаемым характеристикам относятся: температура поверхности нагревательного элемента при стационарном режиме, равномерность распределения теплового потока, тепловая инерционность и эффективность обогрева, увеличенная скорость выхода на рабочий режим, надежность и долговечность. Это, в частности, достигается переходом от традиционных трубчатых электронагревателей (ТЭНов) к элементам на основе открытых спиралей, а также последующим введением в цепь нагрева силовых полупроводниковых диодов (СПД). При этом за счет снижения эффективных значений тока и мощности нагрева (при сохранении их амплитудных значений) удастся примерно вдвое снизить активное сопротивление нагревательных элементов, т.е. их габариты и стоимость. Однако использование СПД приводит к появлению высших гармоник, ИРП в подводящих проводах и окружающем пространстве. Поэтому существенную задачу представляет исследование уровней высших гармоник в зависимости от характеристик СПД, схемотехнического решения электронагревательного устройства, а также определение уровня излучаемой мощности на гармониках. В литературе эти вопросы исследованы недостаточно.

Задачи моделирования паразитных колебаний и проведение их экспериментального исследования важны для технических приложений и при проектировании ЭНУ.

Не менее значима проблема снижения уровня высших колебаний в устройствах СВЧ нагрева, в которых необходимо, с одной стороны, максималь-

но сконцентрировать достаточно равномерное электромагнитное поле в рабочей области, где происходит термообработка (сушка) объектов микроволнового воздействия, а с другой – необходимо минимизировать уровень электромагнитного поля СВЧ в областях, откуда возможно его излучение в свободное пространство. При этом уровень высших мод в многомодовых резонаторах этих систем желательно существенно снизить. Рассматриваемые промышленные установки СВЧ нагрева имеют открытые окна для конвейерной подачи продукта, и встает задача подавления излучения из них путем использования загораживающих фильтров.

Важной задачей является проведение экспериментальных исследований, позволяющих, с одной стороны, оценить адекватность построенных моделей, а с другой - проверить фактическое распределение полей в различных вариантах построения разрабатываемой электродинамической системы. В этой связи ставилась задача разработки математических моделей на основе интегральных уравнений для распределения поля в системе, а также расчет фильтров по заданному значению интенсивности поля на апертуре окна. Модель адаптирована к прямоугольной камере СВЧ нагрева, возбуждаемой прямоугольным волноводом переменного сечения с продольной щелью.

Сформулированные выше вопросы определили актуальность проведенных в настоящей диссертационной работе исследований и позволили сформулировать общую цель диссертационной работы: определение уровней паразитных электромагнитных колебаний и излучений в системах нагревательного и электромеханического типов, включая системы СВЧ обработки материалов, и разработка методов их подавления.

Для достижения указанной цели представлялось необходимым решить следующие основные задачи:

1. Разработка математических моделей, адекватно описывающих стационарный и нестационарный режимы работы электронагревательных устройств различного типа с нелинейным полупроводниковым элементом и с учетом нелинейности тепловых процессов (т.е. излучения по закону Стефана-Больцмана), методов их экспериментального исследования.
2. Разработка теоретических и экспериментальных методов оценки уровня напряжения радиопомех, создаваемого СПД, методов определения корреляции уровня создаваемых радиопомех с собственными характеристиками диодов, определение влияния выбора схемного решения (способа и места включения СПД в схему сложного электронагревательного устройства) на уровень создаваемых радиопомех.
3. Выбор типа ЭНУ и их элементной базы на основе моделирования и экспериментов.
4. Разработка математической модели для анализа и синтеза реакторов помехоподавления, учитывающей связь их индуктивности с конфигурацией токопроводящей ленты, конфигурацией и магнитной проницаемостью материала электромагнитного экрана, и выполнение на этой основе расчета различных конфигураций РП с электромагнитными экранами с уче-

том межвитковых и специально введенных емкостей, и без них; проведение экспериментального исследования синтезированных конфигураций реакторов помехоподавления.

5. Моделирование и экспериментальное исследование прямоугольной камеры СВЧ нагрева с распределенным вводом мощности; исследование уровня паразитных излучений из окон подачи продукта.

Научная новизна результатов работы:

- Впервые в задаче для цилиндрических электронагревательных элементов с несколькими концентрическими слоями получено решение уравнения теплового баланса с учетом конвекции и закона излучения Стефана-Больцмана в уравнениях теплопроводности и интегрального баланса, описывающее нестационарные процессы остывания и нагрева, динамику распределения температуры и позволившее оценить различие в поведении сравниваемых систем.

- Впервые с учетом нелинейных барьерной и диффузионной емкостей, а также влияния технологического разброса характеристик СПД в составе ЭНУ проведен расчет уровня нелинейных искажений в цепи переменного тока и создаваемых промышленных радиопомех. Проведено экспериментальное исследование уровней ИРП от сверхнизких частот до УВЧ, создаваемых разными отечественными и зарубежными СПД, включенными по различным схемам в цепи электронагревательных элементов.

- На основе экспериментальных исследований и теоретических расчетов индуктивности с электромагнитными экранами определена дисперсия магнитной проницаемости электротехнической стали μ , а также ее влияние на частотную характеристику подавления РП для слабых токов. Для импульсов сильных токов исследовано влияние нелинейности и насыщения μ на подавление гармонических составляющих, а также исследовано помехоподавление вплоть до СВЧ диапазона.

- На основе интегро-дифференциальных уравнений для электрического вектор-потенциала впервые получены соотношения для определения индуктивности реакторов помехоподавления (РП). Методом последовательных приближений проведен расчет индуктивностей с учетом электромагнитных экранов для нескольких конфигураций РП.

- Проведено экспериментальное и теоретическое исследование распределения электромагнитного поля в прямоугольной резонансной камере, возбуждаемой через щель связи прямоугольным волноводом переменного сечения. Измерение проведено по впервые разработанной оригинальной методике, использующей косвенный подход – путем измерения излучения из боковой плоскости камеры через отверстия в металлической пластине, закрывающей соответствующую ей плоскость.

Достоверность научных результатов и выводов работы подтверждается соответствием проведенных экспериментальных исследований с данными численного моделирования, применением строгих в рамках постановки

задачи моделей, а в ряде случаев совпадением этих данных с аналитическими результатами.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Одновременное отключение источника нагрева и теплосъема с цилиндрического композитного электронагревательного элемента приводит к кратковременному резкому повышению, а затем спаду температуры его оболочки по сравнению со стационарным режимом одновременного нагрева и теплосъема, при этом учет закона Стефана-Больцмана при моделировании этого эффекта играет определяющую роль и позволяет существенно улучшить соответствие теоретических и экспериментальных данных.
2. Коэффициент гармонических искажений в цепях со встречно включенными и расположенными в параллельных ветвях с нагревательными элементами силовыми диодами существенно меньше, чем в каждой из ветвей в отдельности. При этом реализуются следующие закономерности: величина коэффициента растет с ростом диффузионной емкости и уменьшается с ростом барьерной емкости и обратного тока диодов; с ростом напряжения питания, когда угол отсечки близок к 90° , вклад нелинейности барьерной емкости компенсируется нелинейностью вольт-амперной характеристики; для типичных параметров нагревательных элементов с силовыми диодами коэффициент гармонических искажений не превышает 0,05.
3. Решение интегро-дифференциальных уравнений магнитостатики для электрического вектор-потенциала методом последовательных приближений приводит к соленоидальному потенциалу, т.е. дает условие калибровки без его первоначального наложения, и корректно учитывает наличие электромагнитных экранов, определяя уже в первом приближении индуктивность с погрешностью не выше 7% относительно экспериментальных данных.
4. В электродинамической системе в виде прямоугольного резонатора, нагруженного диэлектрической пластиной и возбуждаемого в плоскости одной из стенок двумя отрезками прямоугольных волноводов с длинными неоднородными щелями в узких стенках вдоль всей длины этих волноводов, средняя оптимальная (по критерию минимума квадрата модуля коэффициента отражения) ширина щелей имеет порядок $\frac{\lambda \cdot b}{l}$, где λ – длина волны, b – ширина узкой стенки, а l – длина отрезка волновода.
5. Модели, методы, результаты расчетов и экспериментов для систем нагревательного и электромеханического типов.

Научно-практическая значимость результатов

1. Введение дополнительных шунтирующих емкостей катушки индуктивности реактора помехоподавления позволяет в несколько раз уменьшить число ее витков при одновременном увеличении подавления помех, при этом влияние межвитковых емкостей в виде всплесков на частотной ха-

рактике подавления уменьшается. Показано, что использование дополнительных шунтирующих емкостей на порядок увеличивает помехоподавление и позволяет, как минимум, на порядок снизить габариты и стоимость.

Используемая в стандартных реакторах лента из электротехнической стали приводит к незначительному (порядка нескольких процентов) увеличению индуктивности, тогда как внешние электромагнитные экраны позволяют увеличить ее в несколько раз.

2. Решение нелинейного одномерного уравнения теплового баланса с учетом излучения прямыми методами показывает возможность значительного (порядка двух раз) возрастания температуры ТЭНов в малом временном промежутке после отключения питания ЭНУ и одновременном прекращении искусственного теплосъема, что является их одним из основных недостатков при сравнении с открытыми спиралями.
3. Разработанная математическая модель для анализа частотной характеристики квазипиковых значений радиопомех, построенная на основе итерационного решения нелинейного уравнения для тока, позволяет оценивать спектр радиопомех.
4. Разработанная на основе метода поверхностных интегралов в приближении заданного поля на щелях модель прямоугольной резонансной камеры СВЧ нагрева с тремя диэлектрическими слоями, возбуждаемой прямоугольным волноводом переменного сечения, позволяет получить распределение квадрата амплитуды электрического поля в нагреваемом слое с перепадом не более 50% по всей длине.

Разработанные математические модели могут использоваться исследователями и инженерами-разработчиками электротехнического и электронного оборудования рассматриваемого типа.

Полученные результаты теоретического и экспериментального исследования практически полностью использованы в научно-производственной фирме «Этна» при проектировании и разработке мощных электронагревательных приборов, реакторов помехоподавления для горэлектротранспорта и промышленного оборудования микроволновой сушки.

Апробация работы и публикации. Результаты исследований докладывались на международных и всероссийских конференциях, в том числе на 4-й международной научно-технической конференции «Радиотехника и связь» (Саратов, 2007), 9-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Саратов, 2010), 10-м международном семинаре “Electromagnetics of Microwaves, Submillimeter and Optical Waves” (Саратов, 2010) и обсуждались на научных семинарах кафедры прикладной физики СГУ.

Материалы диссертации представлены в 17 опубликованных работах. Из них 3 статьи в реферируемых изданиях, входящих в список ВАК, 2 труда конференций, 6 патентов РФ.

Личный вклад автора. Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично автором. Соискателем проведены численные и натурные эксперименты, выполнен теоретический анализ упрощенных моделей.

Содержание работы

Материалы диссертации изложены на 140 страницах, содержат 43 рисунка и список цитированной литературы из 107 наименований. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков цитированной литературы и собственных работ автора.

Во введении: сформулированы цель и основные задачи данной диссертационной работы. На базе имеющейся литературы и другой информации обоснованы актуальность описанных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований, а также достоверность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе анализа имеющейся литературы рассматриваются проблемы электромагнитной совместимости, в том числе применительно к трем классам исследуемого в настоящей работе электронного и электротехнического оборудования:

- электронагревательным приборам среднего и высокого уровня мощности, в которых с целью миниатюризации и снижения себестоимости используются создающие нелинейные искажения полупроводниковые элементы;
- реакторам помехоподавления – специальным устройствам, включаемым в цепи электропитания подвижных средств электротранспорта для подавления паразитных колебаний, создаваемых вне этих средств в контактной сети, а также паразитных колебаний, генерируемых внутренними электромеханическими системами этих подвижных средств и передаваемых от них в контактную сеть;
- промышленным установкам СВЧ нагрева, в которых необходимо принимать адекватные меры для удовлетворения требований санитарно-гигиенических норм по уровню излучаемой в пространство СВЧ энергии.

Проводится классификация как самих источников нелинейных искажений, паразитных колебаний в системах, так технического и медико-биологического характера, связанных с появлением повышенных уровней промышленных радиопомех (ИРП) в цепях постоянного и переменного тока, а также паразитных электромагнитных колебаний в эфире.

Большое внимание уделяется в главе приемам и методам подавления (снижения уровня) паразитных колебаний, в частности, методам снижения неоднородности и локализации электромагнитных полей в системах СВЧ нагрева.

В заключении главы приводится расширенная формулировка поставленных в работе основных задач.

Во второй главе постановка изучаемой проблемы основывается на конкретной технической задаче – миниатюризации и снижения себестоимости электронагревательных приборов среднего и высокого уровня мощности.

В начале главы приводится ряд теоретических и экспериментальных исследований, направленных на научно-обоснованный выбор электронагревательного элемента. Локализуется этот выбор на двух основных типах таких элементов – трубчатых электронагревателях (ТЭНах) и открытых спиралях. Сравнение проводится по целому набору параметров: локализации мощности, эффективности теплосъема, температуре поверхности нагревательных элементов, скорости нагрева и остывания (длительности переходных процессов) и т.п.

Анализ нестационарных режимов работы нагревательных элементов проводится на основе разработанной в диссертационной работе математической модели. Она построена на основе решения уравнения теплового баланса, полученного с использованием метода Рунге-Кутты. Результаты сравнительного анализа этих систем проверены экспериментально.

Показано, что по всему рассматриваемому набору технических и потребительских характеристик открытые спирали имеют значительные преимущества перед ТЭНами.

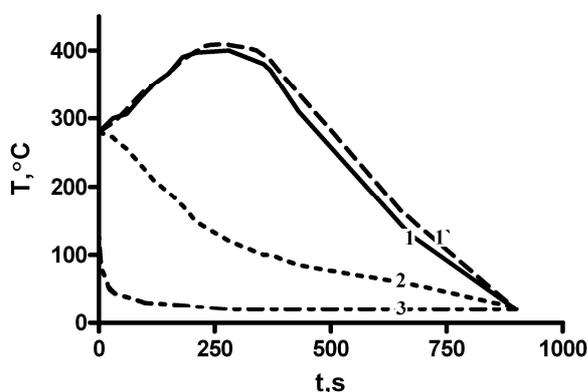


Рис.1 Экспериментальные температурно-временные зависимости поверхности ТЭНа (кривая 1 соответствует случаю одновременного отключения напряжения и искусственного теплосъема, 2 – случаю отключения напряжения) и открытой спирали (кривая 3 получена при аналогичных условиях для кривой 1). 1' – теоретическая кривая для ТЭНа. Отсчет времени во всех измерениях начинается с момента отключения напряжения питания нагревательного блока.

Для этого типа нагревательных элементов рассматривается еще один вариант дальнейшей миниатюризации и снижения себестоимости системы за счет введения последовательно с нагревательными элементами устройства силовых полупроводниковых диодов.

Смысл этого приема заключается в том, что при введении диода можно перейти от требуемых эффективных значений переменного тока на двух полупериодах синусоидального напряжения к идентичному среднему значению тока при поступлении продетектированного однополупериодного напряжения. Это может вдвое снизить активное сопротивление нагревательных элементов, а соответственно габаритные размеры и стоимость электронагревательного оборудования.

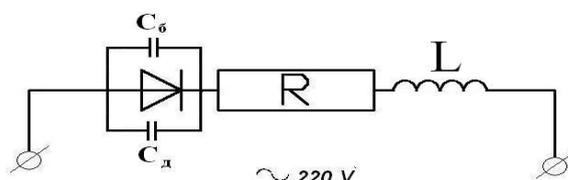


Рис. 2 Диод в схеме нагревателя. C_b , C_d – соответственно барьерная и диффузионная емкости p-n перехода.

Однако диоды в электрических цепях являются источником нелинейных искажений. В этой связи основной задачей, решаемой во второй главе, является задача анализа уровня промышленных радиопомех (ИРП), создаваемых диодом в цепи переменного тока, а также задача минимизации уровня ИРП.

С этой целью во второй главе диссертационной работы разработана математическая модель для анализа частотных характеристик квазипиковых значений радиопомех. Модель построена с использованием функций Берга и позволяет устанавливать взаимосвязь между собственными характеристиками диода и уровнем ИРП, создаваемых ими в цепях переменного тока во всем диапазоне частот, в которых уровень радиопомех нормируется и подлежит минимизации.

На основе проведенного анализа показано, что данная проблема действительно существует, и требуются действенные меры для снижения уровня ИРП ниже установленных действующими нормативами границ.

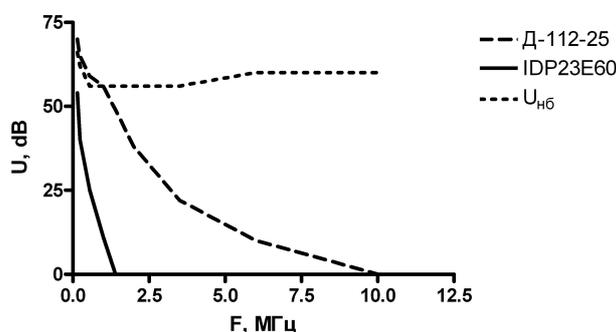


Рис. 3 Частотные зависимости напряжений радиопомех, создаваемых исследуемыми диодами. U_{nb} показывает предельно допустимый уровень напряжения ИРП по бытовым нормам

Далее в главе рассматриваются два возможных и не исключающих друг друга подхода к снижению уровня ИРП. Первый из них основан на установленных взаимосвязях уровня ИРП с собственными характеристиками диодов. На основании проведенных расчетов показано, что диоды, изготовленные на основе полупроводниковых структур, выполненных по планарной технологии, с малым временем восстановления, характеризуются существенно (на 15÷17db) меньшим уровнем вносимых ими нелинейных искажений, чем диоды, изготовленные по традиционным технологиям.

Вторым резервом снижения уровня ИРП являются схемные решения. Как правило, электронагревательные приборы среднего, а тем более высокого уровня мощности строятся по сложным схемам, в которых между каждой парой потенциальных точек (фаза-фаза, либо фаза-нейтраль) включаются две и более параллельных ветви нагревателей. При включении диодов в этих параллельных ветках навстречу друг другу паразитные колебания соседних ветвей складываются в противофазе. Рассмотрены и иные схемные подходы к снижению уровня ИРП ниже установленных норм.

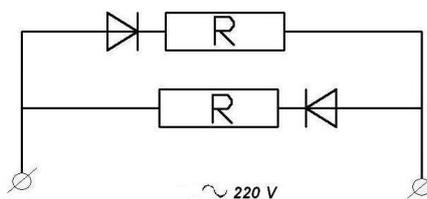


Рис. 4. Схема подключения диодов в параллельных ветвях во встречных направлениях

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили предсказанную теоретически возможность уменьшения величин ИРП в цепях электронагревательных устройств, использующих силовые полупроводниковые диоды, существенно ниже установленных норм.

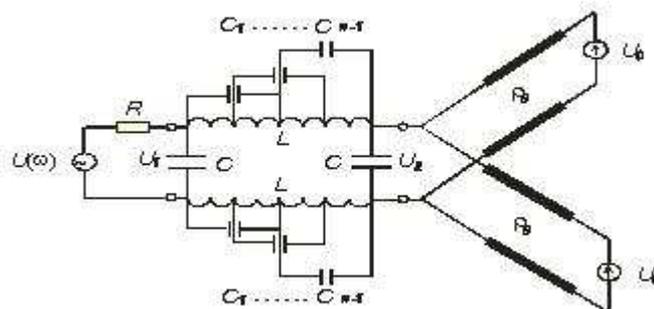
Третья глава диссертационной работы посвящена исследованию и улучшению параметров специального класса устройств, используемых непосредственно для снижения уровня ИРП – реакторов помехоподавления (РП). Эти устройства традиционно используются в подвижных средствах электро-транспорта – электропоездах и в горэлектротранспорте (троллейбусах, трамваях) для двух назначений.

Во-первых, они гасят паразитные колебания, возникающие в контактных цепях при любых коммутационных процессах, изменениях качества механического прилегания токоприемника к контактному проводу, защищают от них электродвигатели и другие электротехнические и электронные устройства транспортного средства.

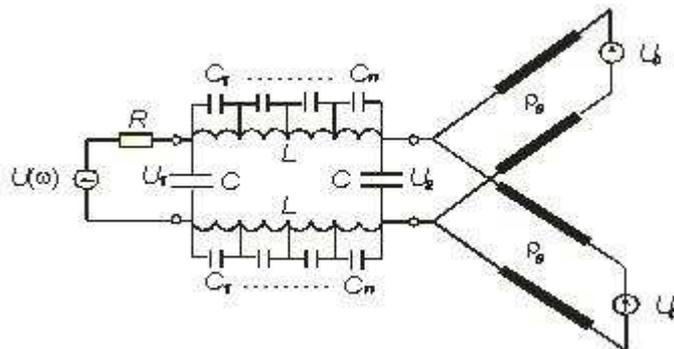
Во-вторых, они осуществляют подавление паразитных колебаний, возникающих при работе двигателя транспортного средства и поступающее от туда в контактную сеть, а далее излучаемые в эфир.

Основной проблемой, связанной с этими устройствами, являются (в их существующей конструкции) габариты, масса и стоимость реакторов. Дело в том, что они традиционно выполняются в виде торроида, получающегося при скручивании ленточного токопровода. Сам токопровод представляет собой широкую, как правило, медную ленту, толщина которой определяется величиной протекающего по ней тока (в электропроводах – до нескольких килоампер). Перед скручиванием в торроид медная лента с двух сторон обкладывается ровной по ширине лентой из электротехнической стали, образующей в конструкции РП своеобразный магнитный экран.

В подвижных средствах горэлектротранспорта вес меди в таких устройствах достигает 50 кг, в электропоездах – более одной тонны.



а)



б)

Рис. 5 Эквивалентная схема РП с учетом межвитковых емкостей (а) и ее приближенная замена (б) при числе витков $n = 4$

Ставилась задача на основе современных радиофизических подходов максимально снизить массу, габариты и себестоимость реакторов помехоподавления.

Для анализа этих устройств была разработана математическая модель, построенная на основе интегро-дифференциальных уравнений для электрического вектор-потенциала. Были получены общие соотношения для определения индуктивности нескольких принципиально различающихся конструк-

ций РП с учетом входящих в них межвитковых емкостей и позволяющие оценить влияние дополнительных шунтирующих емкостей.

Модель позволяет учитывать также влияние нелинейности намагничивания материала магнитного экрана, частотной дисперсии его магнитной проницаемости и конфигурацию экрана.

Расчеты, проведенные по этой модели, позволили осуществить синтез вариантов РП, имеющих в несколько раз меньшие габариты и массу по сравнению с традиционными конструкциями реакторов помехоподавления. Проведенные в этой главе экспериментальные исследования полностью подтвердили расчетные характеристики синтезированных теоретически вариантов конструкции.

Следует особо отметить, что поиск искомых соотношений для индуктивности РП при наличии магнитных и электромагнитных экранов проводился методом последовательных приближений. При этом было показано, что обычно налагаемое условие калибровки потенциала в виде его соленоидальности следует как результат метода последовательных приближений.

В заключении главы приведено описание синтезированного расчетным путем и разработанного реактора помехоподавления.

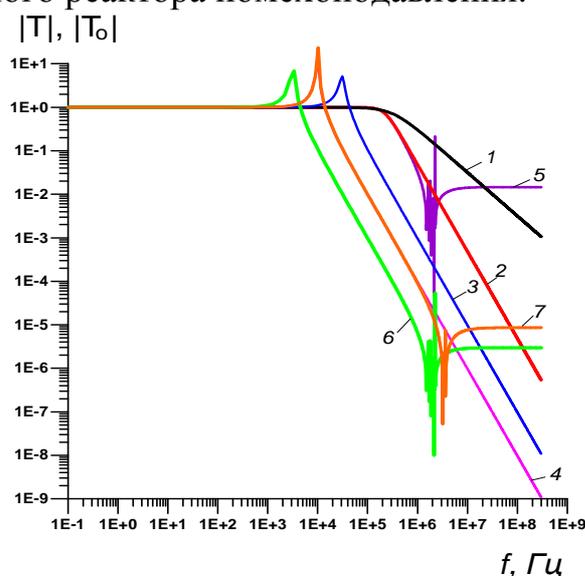


Рис. 6 Коэффициенты передачи T_0 (1) и T (2-6) для $L=130$ мкГн (1-6) и 13 мкГн (7) при емкостях C соответственно $1.92 \cdot 10^{-9}$ (2, 5), 10^{-7} (3), 10^{-6} (4), 10^{-5} (6) Ф. Кривые 5 и 7 построены с учетом межвитковых емкостей.

В четвертой главе рассматриваются близкие к задачам минимизации уровня паразитных излучений задачи анализа и синтеза конфигурации электромагнитного поля в электродинамической камере промышленной установки СВЧ нагрева. Связь их очевидна. Чем лучше локализовано поле в рабочей камере такой системы в области подвергаемого СВЧ воздействию диэлектрика, чем больше мощности в нем выделяется, тем меньше ее переизлучится в объем рабочей камеры и тем меньше, соответственно, попадет в пространство вне установки через дефекты радиогерметичных соединений элементов

рабочей камеры и радиоэкранированные каналы для прохода транспортной ленты. При этом, разумеется, необходимо одновременно обеспечить максимальную однородность распределения электромагнитного поля СВЧ в области прохождения облучаемого диэлектрика.

Моделирование электродинамической системы осуществлялось на основе строгой модели, основанной на методе интегральных уравнений поля. Анализ проводился для одного из возможных вариантов такой системы – прямоугольной резонансной камеры, возбуждаемой прямоугольными волноводами переменного сечения через щель связи, ширина которой изменяется по длине волновода.

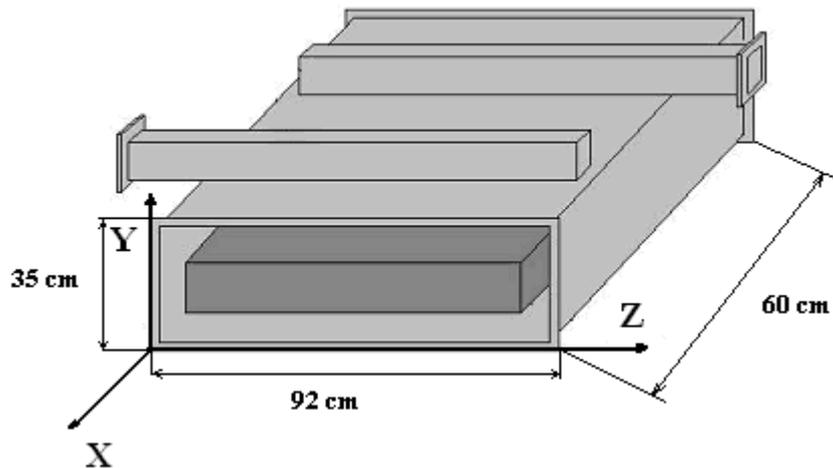


Рис. 7 Исследуемая система СВЧ нагрева и расположение диэлектрического слоя в резонаторе.

Представляя поле на щелях в виде бегущих в противоположные направления волн, модулируемых полусинусоидой, и определяя поля внутри камеры через электрический и магнитный векторы Герца, а затем, сшивая поля на границе возбуждающего волновода и возбуждаемой резонансной камеры, имеем интегральные соотношения для электрического поля внутри камеры в виде

$$\vec{E}(x, y, z) = \int_{x_1}^{x_1+s} \int_0^c \hat{K}(x, y, z | x', z') \vec{e}_1(x', z') dx' dz' + \int_{x_2}^{x_2+s} \int_0^c \hat{K}(x, y, z | x', z') \vec{e}_2(x', z') dx' dz'$$

с тензорным ядром, имеющим компоненты $K_{\alpha,\beta}$, $\alpha = x, y, z$; $\beta = x, z$.

В подтверждение полученных теоретически результатов проводилось экспериментальное исследование распределения поля в системах этого типа. Для этого была разработана оригинальная методика, основанная на косвенном подходе. Фактически измерялось излучение на боковой плоскости исследуемой резонансной камеры через одинакового размера отверстия в закрывающей эту плоскость металлической пластине. Эксперимент подтвердил основные полученные теоретически закономерности.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о возможности проектирования систем такого типа, поскольку в них реализуется приемлемое согласование волноводов с электродинамической камерой и относительно неплохая равномерность распределения электромагнитного поля в электродинамической камере. Это позволяет говорить о принципиальной применимости исследуемой системы для использования в установках интенсивного микроволнового воздействия.

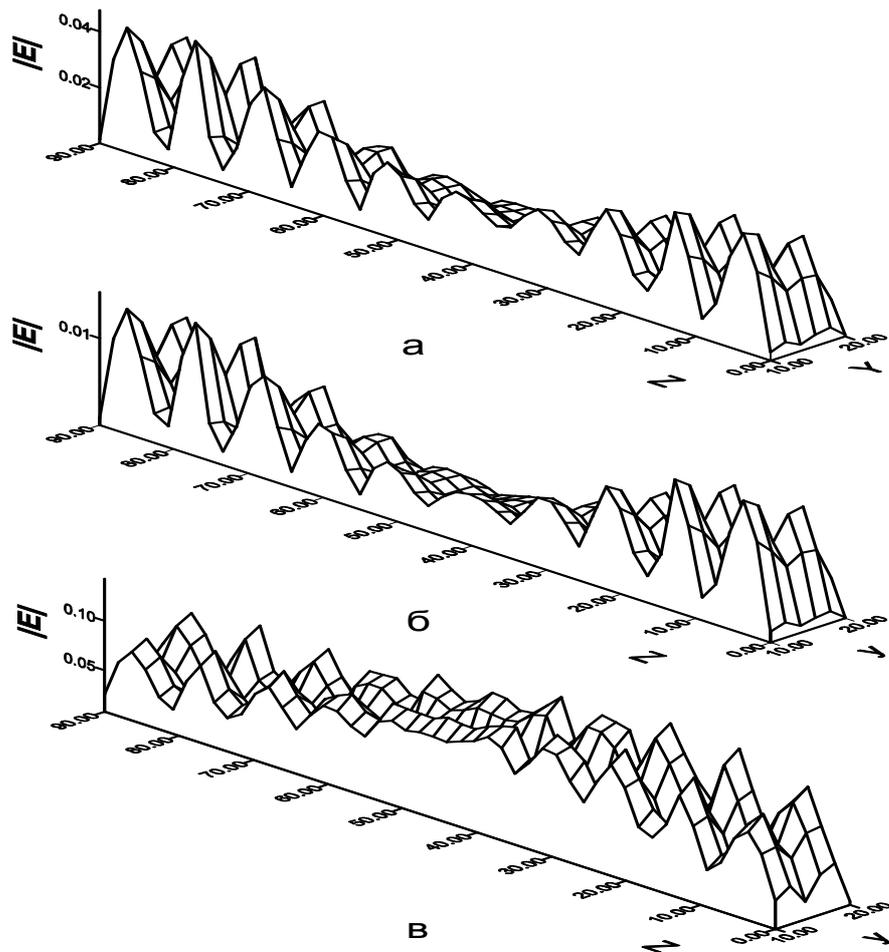


Рис.8 Распределение амплитуды электрического поля в плоскости YZ при $x_0=25$ см внутри образца толщины 10 см (далее все размеры в см), находящегося в камере с размерами $a=60$, $b=20$, $c=90$ на расстоянии $d=10$ от щелей $x_1=15.5$, $x_2=40.5$: а) $h=4$, $\epsilon'=5$, $\epsilon''=0.5$; б) $h=2$, $\epsilon'=5$, $\epsilon''=0.5$; в) $h=2$, $\epsilon'=5$, $\epsilon''=0.1$. Волновод $a_0=9$, $b_0=4.5$, амплитуды полей на щелях одинаковы, сдвиг фаз отсутствует.

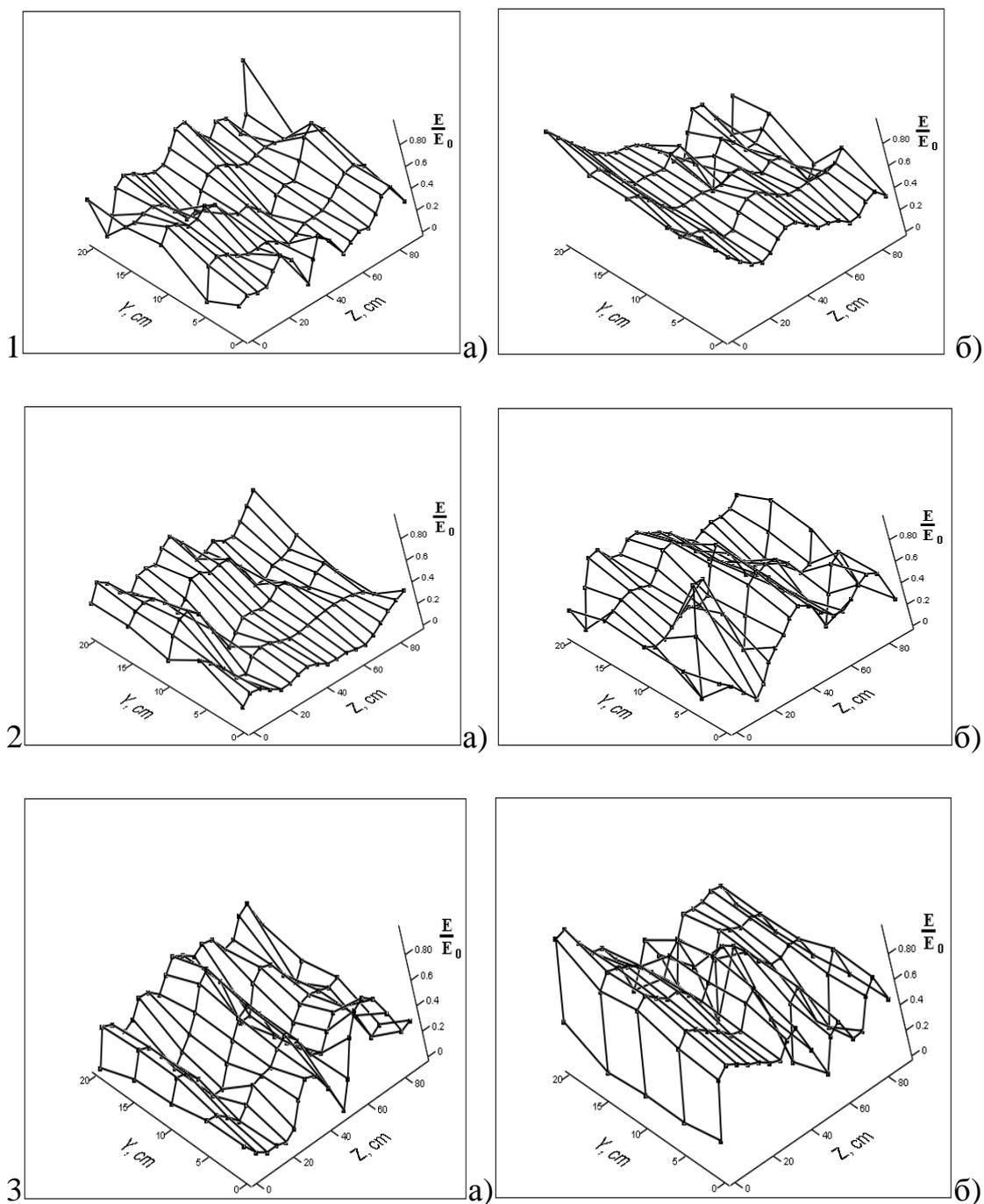


Рис.9 Распределение поля в системе на дальней (а) и ближней (б) стенках относительно возбуждающего волновода при размере щели связи 1- 3 мм, 2 – 8 мм, 3 – 10 мм.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты и выводы.

1. Уровень паразитных гармоник тока в цепях с нагревательными элементами и диодами уменьшается с уменьшением диффузионной емкости и увеличением барьерной емкости, и обратного тока диода.

2. Две параллельные ветви с нагревательными элементами и полупроводниковыми диодами, включенными в противоположных направлениях, образуют цепь, коэффициент гармоник которой на порядок меньше коэффициента гармоник каждой из ветвей и не превышает 0,05.
3. Лента из электротехнической стали, проложенная между токоведущими витками, практически не оказывает влияния на индуктивность РП, тогда как внешние магнитные экраны позволяют ее увеличить в 2 раза.
4. Расчет, проведенный по основанной на методе интегральных уравнений электромагнитного поля строгой модели прямоугольной резонансной камеры СВЧ нагрева, возбуждаемой прямоугольным волноводом переменного сечения, показывает, что уменьшение ширины щели (в диапазоне значений до 3 мм) приводит к увеличению амплитуды высокочастотного электрического поля в обрабатываемом диэлектрическом слое при одновременном увеличении однородности распределения поля вдоль щели, однако при этом несколько уменьшается КПД передачи энергии из возбуждающего волновода в камеру.
5. Принципиального различия в распределении поля для случаев однонаправленного и противоположно направленного распространения мощности в соседних возбуждающих волноводах не наблюдается, однако связь между волноводами в последнем случае лучше.
6. В случае малых щелей имеется большая локализация поля вблизи щелей, однако равномерность распределения поля вдоль щели значительно возрастает.

Содержание диссертации изложено в следующих работах:

В изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Давидович М.В., Козлов А.В. Интегро-дифференциальные уравнения и индуктивность при наличии электромагнитных экранов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010, №2, С. 46-51.
2. Козлов А.В., Шаповалов А.С. О возможности использования силовых полупроводниковых диодов в электронагревательных приборах // Естественные и технические науки. 2010. №3, С. 35-43.
3. Козлов А.В. Исследование нелинейных теплофизических характеристик открытых спиралей и трубчатых электронагревателей, реализуемых в нестационарных режимах их работы.// Естественные и технические науки. 2010 г. № 4, С. 41.-45.

В других изданиях:

4. Ветров В.Б., Давидович М.В., Козлов А.В. Моделирование и экспериментальное исследование прямоугольной камеры СВЧ нагрева с распределенным вводом мощности // Радиотехника и связь. Материалы 4-й межд. н-т. конф. Саратов: СГТУ. 2007. С. 179–185.
5. Ветров В.Б., Давидович М.В., Козлов А.В., Шаповалов А. С. Моделирование и экспериментальное исследование прямоугольной резонансной камеры СВЧ нагрева, возбуждаемой прямоугольным волноводом переменного сечения. Часть 1. Моделирование и теоретический анализ // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 14. 2007. С. 60–63.

6. Ветров В.Б., Давидович М.В., Козлов А.В., Шаповалов А. С. Моделирование и экспериментальное исследование прямоугольной резонансной камеры СВЧ нагрева, возбуждаемой прямоугольным волноводом переменного сечения. Часть 2. Экспериментальное исследование // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 14. 2007. С. 64–68.
7. Козлов А.В., Шаповалов А.С., Явчуновский В.Я. Сравнительный анализ характеристик открытых спиралей и ТЭНов в составе электронагревательных приборов. Часть 1. Расчет тепловых полей в стационарных и нестационарных тепловых режимах// Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 15. 2008. С. 53-58.
8. Козлов А.В., Шаповалов А.С., Явчуновский В.Я. Сравнительный анализ характеристик открытых спиралей и ТЭНов в составе электронагревательных приборов. Часть 2. Экспериментальное исследование стационарных и нестационарных режимов// Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. Вып. 15. 2008. С. 58-63.
9. Козлов А.В, Скрипаль А.В., Шаповалов А.С., Явчуновский В.Я. Оценка уровней паразитных колебаний, создаваемых в цепи переменного тока силовыми полупроводниковыми диодами в составе электронагревательных устройств. Часть 1.// Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2009. Вып. 16. С.48-54.
10. Козлов А.В. Оценка уровней паразитных колебаний, создаваемых в цепи переменного тока силовыми полупроводниковыми диодами в составе электронагревательных устройств. Часть 2.// Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2009. Вып. 16. С.55-56.
11. Давидович М.В., Козлов А.В. Сравнительный анализ методик оценки и моделирование спектров высших гармоник силовых полупроводниковых диодов.// Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП). Материалы междунар. конф. Саратов: СГТУ. 2010. С.464–470.

В патентах РФ:

12. Козлов А.В., Явчуновский В.В., Явчуновский В.Я. Воздухоподогреватель салона электротранспорта. Патент на изобретение 2008102712 от 29.01.08.
13. Козлов А.В., Явчуновский В.В., Явчуновский В.Я. Устройство для подогрева воздуха салона электротранспорта. Патент на полезную модель 2008102714 от 29.01.08.
14. Козлов А.В., Явчуновский В.В., Явчуновский В.Я. Отопитель электротранспортный. Патент на промышленный образец 2008500244 от 29.01.08.
15. Козлов А.В., Явчуновский В.В., Явчуновский В.Я. Воздухоподогреватель кабины водителя электротранспорта. Патент на изобретение 2008102711 от 29.01.08.
16. Козлов А.В., Явчуновский В.В., Явчуновский В.Я. Устройство для подогрева воздуха кабины электротранспорта. Патент на полезную модель 2008102713 от 29.01.08.
17. Козлов А.В., Явчуновский В.В., Явчуновский В.Я. Отопитель кабины водителя электротранспорта. Патент на промышленный образец. 2008500245 от 29.01.08.