

На правах рукописи

Омиров Андрей Антонович

**МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
КОАКСИАЛЬНОГО МАГНЕТРОНА, РАБОТАЮЩЕГО ПРИ МАЛОЙ
ДЛИТЕЛЬНОСТИ ФРОНТА МОДУЛИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСА**

Специальность 05.12.07 - Антенны, СВЧ – устройства и их
технологии

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2013

Работа выполнена на кафедре радиоэлектроники и телекоммуникаций Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшей школы экономики».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций
МИЭМ НИУ ВШЭ
Нефедов Владимир Николаевич

Научный консультант: доктор технических наук
Гурко Александр Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
кафедры светотехники ФГБОУ ВПО «НИУ МЭИ»
Гутцайт Эдуард Михайлович

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник филиала
ФГКУ "46 ЦНИИ" Минобороны России
Петров Александр Михайлович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие "Научно-производственное
предприятие "Исток" (ФГУП "НПП "Исток")

Защита состоится 4 июня 2013 года в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.01 при ФГБОУ ВПО МТУСИ по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-448.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО МТУСИ.

Автореферат разослан “ ____ “ апреля 2013 года.

Ученый секретарь совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д 219.001.01
кандидат технических наук, доцент

Иванюшкин Р.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Конструкция коаксиального магнетрона позволила получить выходной сигнал с параметрами, значительно превосходящими параметры классического магнетрона. Благодаря этому последние вытесняются коаксиальными магнетронами во многих областях применения в диапазонах длин волн от 8 мм до 3 см.

В современной радиоэлектронике наблюдается ярко выраженная тенденция к увеличению частоты зондирующего сигнала. Это способствует увеличению разрешающей способности радиолокационной системы. Поэтому задача продвижения коаксиальных магнетронов в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн является весьма актуальной.

Наиболее «слабым» параметром коаксиального магнетрона, ограничивающим области его применения, является относительно высокий уровень флуктуации фронта огибающей высокочастотного импульса при малых величинах фронта модулирующего импульса. Малая длительность фронта модулирующего импульса позволяет увеличить разрешающую способность радиолокатора по дальности.

Цель работы и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является разработка метода проектирования колебательной системы коаксиального магнетрона коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, работающего при длительности фронта модулирующего импульса, сравнимой с магнетронами без стабилизирующего резонатора.

В соответствии с поставленной целью решены следующие основные задачи:

- выделены проблемы, возникающие при разработке и производстве коаксиальных магнетронов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн;
- разработан способ повышения стабильности работы коаксиальных магнетронов при малых длительностях фронта модулирующего импульса (на уровне магнетронов без стабилизирующего резонатора);
- проведено моделирование электродинамических параметров анодных замедляющих систем с использованием различных режимов взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем и выбран режим, позволяющий преодолеть известные трудности при разработке и производстве коаксиальных магнетронов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн;

- предложен метод расчета степени «разрушения» спектра пространственных гармоник высокочастотного поля щелевого вида колебаний (оцениваемой по величине диссипативных потерь анодной замедляющей системы при нормировании амплитуды π -видной гармоники к единице) при использовании групп щелей связи, отличающихся по профилю или размерам, позволивший выбрать наиболее эффективный закон группировки щелей связи и минимализировать конкурирующее воздействие этого вида колебаний с минимальным ухудшением параметров рабочего вида колебаний;

- разработаны отличные от традиционных рекомендации по выбору геометрических параметров стабилизирующего резонатора коаксиального магнетрона, позволяющие в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн достигнуть плотности перестройки частоты, обеспечивающей приемлемые виброустойчивость и воспроизводимость частоты при работе на литерных частотах;

- разработан метод проектирования колебательной системы коаксиального магнетрона миллиметрового диапазона длин волн, позволяющий провести полный расчет электродинамических характеристик коаксиального магнетрона и не требующий многократной (более 1-го раза) корректировки размеров;

- апробация и внедрение результатов работы в производство.

Методы исследования.

Теоретические исследования проведены с использованием математических аппаратов электродинамики, теории электромагнитного поля, метода эквивалентных схем, теории электрических цепей. При трехмерном моделировании использовался метод конечных элементов. Экспериментальные исследования проведены на отдельных деталях и узлах коаксиальных магнетронов миллиметрового и сантиметрового диапазонов длин волн.

Научная новизна.

В работе получен ряд результатов, имеющих научную новизну:

1. Представлен метод проектирования колебательной системы коаксиальных магнетронов миллиметрового диапазона длин волн, позволяющий провести расчет ее электродинамических характеристик и значительно снизить трудоемкость разработки коаксиального магнетрона с современными выходными параметрами.

2. Предложен волноводный метод расчета параметров щелевого вида колебаний, применимый в коаксиальных магнетронах с анодной замедляющей системой с толщиной периферийной стенки более $0,07\lambda_{раб}$ ($\lambda_{раб}$ – рабочая длина волны).

3. Предложена основанная на теории поля расчетная методика, позволяющая оценить вклад синхронной (конкурирующей) гармоники щелевого вида колебаний в суммарное высокочастотное поле при применении группировки щелей связи с отличающимися профилями или размерами.

4. Предложены рекомендации по проектированию анодной замедляющей системы с использованием режима взаимодействия электронного потока с высшей пространственной гармоникой π вида колебаний, по уровню диссипативных потерь находящейся на уровне классических анодных замедляющих систем и позволяющей снизить необходимую для стабильной работы коаксиального магнетрона длительность фронта модулирующего импульса.

5. Предложено использование стабилизирующего резонатора, являющегося отрезком волновода, близкого к запредельному для волны типа H_{01} , и разработаны рекомендации по его проектированию. Применение такого стабилизирующего резонатора позволяет обеспечить выполнение требований по виброустойчивости и воспроизводимости частоты при работе на литерных частотах в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн.

Достоверность научных положений, выводов, рекомендаций подтверждается корректностью разработанных моделей, сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований, сравнением полученных результатов с результатами, опубликованными ранее в научных публикациях, результатами внедрения разработанных рекомендаций в процессы проектирования и производства коаксиальных магнетронов.

Практическая ценность результатов диссертации состоит в следующем:

1. Предложенные методы позволяют снизить объем расчетов и экспериментальных работ при создании новых магнетронов за счет достижения идеологического единообразия конструкции и ее технологической реализации, что, в свою очередь, значительно снизит материальные и временные затраты на проектирование КМ с современными выходными параметрами.

2. Разработанные расчетные методы позволяют усовершенствовать параметры существующих коаксиальных магнетронов сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазонов длин волн.

3. Показана возможность создания коаксиальных магнетронов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн с параметрами, превосходящими известные модели магнетронов этого диапазона длин волн.

4. Использование разработанных рекомендаций по выбору параметров колебательной системы позволяет создавать параметрические ряды коаксиальных магнетронов.

Апробация результатов работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и вузовских научных конференциях:

- на научных семинарах кафедры «Лазерные и микроволновые информационные системы» МИЭМ;

- в 2010, 2011 и 2012 г. на научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ;

- на X и XI межвузовских научных школах молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» в НИЯФ МГУ (2010 и 2011 г.);

- на 6-й отраслевой конференции «Технологии информационного общества» в МТУСИ (2012 г.);

- на 67-й Всероссийской конференции с международным участием «Научная сессия, посвященная Дню радио» (2012 г.);

- на международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» («АПЭП – 2012») в СГТУ (2012 г.);

- на 22-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» («КрыМиКо – 2012») в СевНТУ. (Доклад отмечен оргкомитетом «3-ей премией за лучшую научную работу, представленную молодым ученым (аспирантом)»).

Публикации по теме работы.

Основные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 19 печатных работах, из них 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 1 авторское свидетельство на программу для ЭВМ.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, имеет общий объем 162 страницы, в том числе 39 рисунков и 24 таблицы, библиографический список из 111 отечественных и зарубежных источников на 12 страницах, приложения с актами внедрения результатов диссертации на 5 страницах.

Реализация результатов диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы нашли применение на производстве в ЗАО «Магратеп», ОАО «Владыкинский механический завод» и Радиоастрономическом институте

НАН Украины; внедрены в учебный процесс МИЭМ НИУ ВШЭ; а также нашли применение в программе «Magnetron dispersion calculator» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611258). Результаты внедрения диссертационной работы подтверждены соответствующими актами.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Применение в коаксиальных магнетронах режима взаимодействия электронного потока с высшей пространственной гармоникой высокочастотного поля π вида колебаний равнорезонаторной анодной замедляющей системы, позволившее разработать такие модели колебательных систем импульсных коаксиальных магнетронов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, использование которых возможно в серийном производстве.

2. Закон группировки щелей связи, при котором уменьшается парциальный вклад синхронной (конкурирующей) гармоники щелевого вида колебаний в суммарное высокочастотное поле, что позволяет соответствующим образом уменьшить эффект подавления за счет диссипативных потерь щелевого вида колебаний и приводит к снижению потерь рабочего вида колебаний H_{011} стабилизирующего резонатора через щели связи.

3. Модель стабилизирующего резонатора, являющегося отрезком коаксиального волновода, близкого к запредельному для волны типа H_{01} , применение которой открывает путь для достижения в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн плотности перестройки частоты, позволяющей обеспечить требования по виброустойчивости и воспроизводимости частоты при работе на литерных частотах (в 4-мм диапазоне длин волн применение такого стабилизирующего резонатора в зависимости от его геометрических параметров позволяет достигнуть плотности перестройки частоты на коротковолновом краю $\sim 2 \div 4,5$ ГГц/мм).

4. Периферийная стенка анодной замедляющей системы толщиной $\sim \lambda_g/4$ (λ_g – рабочая длина волны в щели связи), позволяющая в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн повысить теплостойкость анодной замедляющей системы.

5. Метод проектирования колебательных систем коаксиальных магнетронов миллиметрового диапазона длин волн, позволяющий провести полный расчет ее электродинамических характеристик и, в отличие от метода, предложенного в работе [1], не требующий многократной (более 1-го раза) корректировки размеров, что позволяет сократить объем экспериментальных исследований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы, изложены основные научные положения, выносимые на защиту. Показаны основные достоинства использования коаксиальных магнетронов (КМ). Определены конкретные задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной в настоящей диссертационной работе цели.

В первой главе "Современные тенденции развития магнетронов" рассмотрено текущее состояние дел в области проектирования магнетронов миллиметрового диапазона длин волн.

Проанализированы различные конструкции магнетронов, в том числе разнорезонаторные магнетроны, полученные методом масштабного моделирования магнетронов сантиметрового диапазона длин волн, и так называемые «магнетроны поверхностной волны» (МПВ), работающие на дублетной составляющей не π вида колебаний. В результате сравнения этих конструкций с конструкцией КМ показаны преимущества последнего по сравнению с остальными.

Показана важность уменьшения длительности фронта модулирующего импульса в радиолокации: с ее уменьшением происходит повышение разрешающей способности радиолокационной станции по дальности, что необходимо для создания высокоточного оружия. Повышение стабильности работы КМ при малой (сравнимой с магнетронами без стабилизирующего резонатора (СР)) длительности фронта модулирующего импульса приведет к значительному расширению областей применения КМ.

Рассмотрены пути уменьшения длительности фронта модулирующего импульса, необходимого для стабильного возбуждения колебаний в КМ: за счет уменьшения рабочей длины волны (при этом уменьшается длительность одного периода колебаний) и за счет уменьшения длительности фронта модулирующего импульса при сохранении частоты (при этом уменьшается количество необходимых для возбуждения рабочего вида колебаний периодов).

При анализе известных подходов к увеличению стабильности работы КМ при малой длительности фронта модулирующего импульса рассмотрена концепция «помогающих видов колебаний», предложенная в работе [1]. Согласно этой теории, повышению стабильности работы КМ при длительности фронта модулирующего импульса, соизмеримой с применяемой в классических магнетронах, способствует увеличение количества резонаторов N анодной замедляющей системы (АЗС).

В результате анализа этой концепции показана ее несостоятельность. Из источника [2] следует, что стабильность возбуждения магнетрона при малой длительности фронта модулирующего импульса растет с увеличением характеристического сопротивления, прямо зави-

сящего от угла раскрыва резонатора. Эксперимент, проведенный в работе [3] по созданию не π -видного КМ 3-см диапазона длин волн с разнорезонаторной системой типа «щель-лопатка» и увеличенным более чем в два раза углом раскрыва резонатора по сравнению с π -видным прототипом, показал, что такой КМ сохраняет стабильность работы при весьма малой длительности фронта модулирующего импульса (0,043 мкс).

Во второй главе "Анализ колебательной системы коаксиального магнетрона" выполнен анализ различных подходов к проектированию таких элементов колебательной системы КМ, как АЗС и СР.

В работе [1] приведен метод проектирования колебательной системы КМ, изначально рассчитанный на сантиметровый диапазон длин волн. Выполнение этих рекомендаций в миллиметровом диапазоне длин волн, особенно в коротковолновой его части, приводит к значительным сложностям, в частности, перегреву ламелей АЗС и потере управляемости частотой. В связи с этим показана необходимость разработки нового метода, предназначенного для проектирования колебательной системы КМ миллиметрового диапазона длин волн.

С целью исследования возможности повышения стабильности работы КМ при малой длительности фронта модулирующего импульса рассмотрены режимы взаимодействия электронного потока с различными видами колебаний и выполнено их сравнение.

Использование в КМ режима взаимодействия электронного потока с низшей пространственной гармоникой вырожденного вида колебаний (при использовании как равнорезонаторной лопаточной АЗС, так и разнорезонаторной АЗС типа «щель-лопатка») позволяет увеличить размеры пространства взаимодействия по сравнению с классической π -видной АЗС без увеличения количества резонаторов. Однако существенное увеличение уровня диссипативных потерь (в $\sim 1,5$ раза при использовании АЗС типа «щель-лопатка» и в ~ 2 раза при использовании лопаточной АЗС) делает применение этого режима нецелесообразным.

В случае применения в КМ режима взаимодействия электронного потока с высшей пространственной гармоникой π вида колебаний (ВПГ) ситуация существенно отличается. При одинаковых размерах пространства взаимодействия по сравнению с классической АЗС количество резонаторов уменьшается втрое. Одновременно увеличивается с ~ 1 до ~ 3 отношение толщины ламелей τ к ширине входной щели в резонатор w , что открывает путь для применения конусных ламелей (ламелей с толщиной, изменяющейся по радиусу линейным образом). В результате угол раскрыва резонатора увеличивается в $\sim 5 \div 9$ раз по сравнению с классической системой, а уровень диссипативных потерь остается на том же уровне, либо незначительно возрастает.

Исследован ряд особенностей, возникающих при проектировании КМ с использованием режима ВПГ: экстремальная зависимость уровня диссипативных потерь в АЗС от угла

раскрыва резонатора ψ и уменьшение уровня диссипативных потерь при увеличении количества резонаторов N АЗС (при сохранении частоты π вида колебаний f , радиуса анода r_a и $\psi > 50^\circ$). Показана возможность подбора в ряде случаев такой комбинации геометрических параметров и количества резонаторов в АЗС на ВПГ, при которой происходит рост как контурного, так и электронного КПД по сравнению с классическими КМ. На рисунке 1 приведена зависимость уровня диссипативных потерь в АЗС на ВПГ в зависимости от количества резонаторов и их угла раскрыва, а на рисунке 2 – 14-резонаторная АЗС на ВПГ для мало-мощного КМ 8-мм диапазона длин волн с установленной керамикой поглощения щелевого вида колебаний.

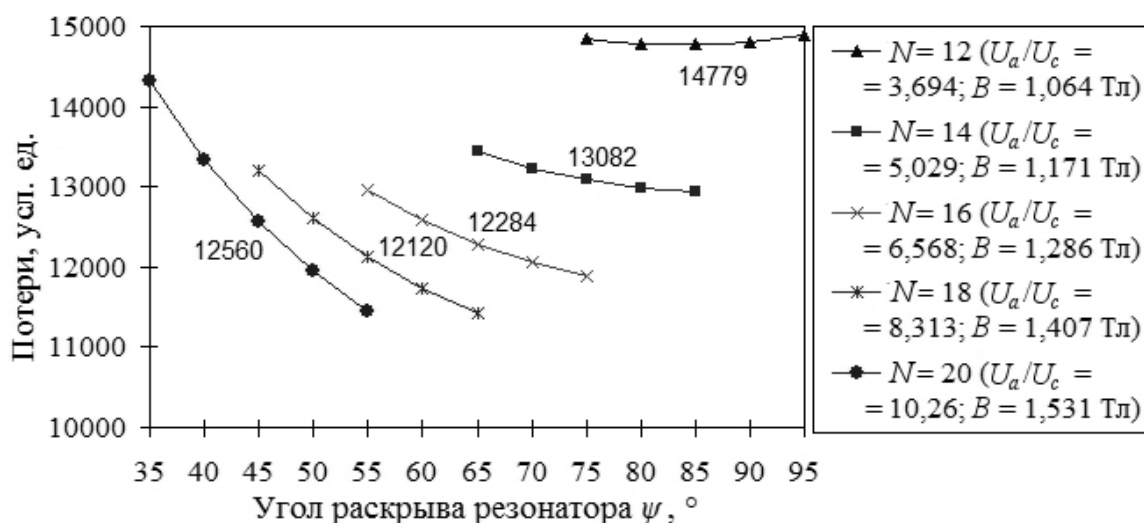


Рисунок 1 – Зависимость величины диссипативных потерь в АЗС от количества резонаторов и угла раскрыва резонатора



Рисунок 2 – 14-резонаторная АЗС на ВПГ для КМ 8-мм диапазона длин волн

Уменьшение крутизны зависимости проводимости резонатора от частоты $Y(f)$ при увеличении угла раскрыва (рисунок 3) позволяет также говорить об уменьшении перепада мощности по диапазону перестройки частоты.

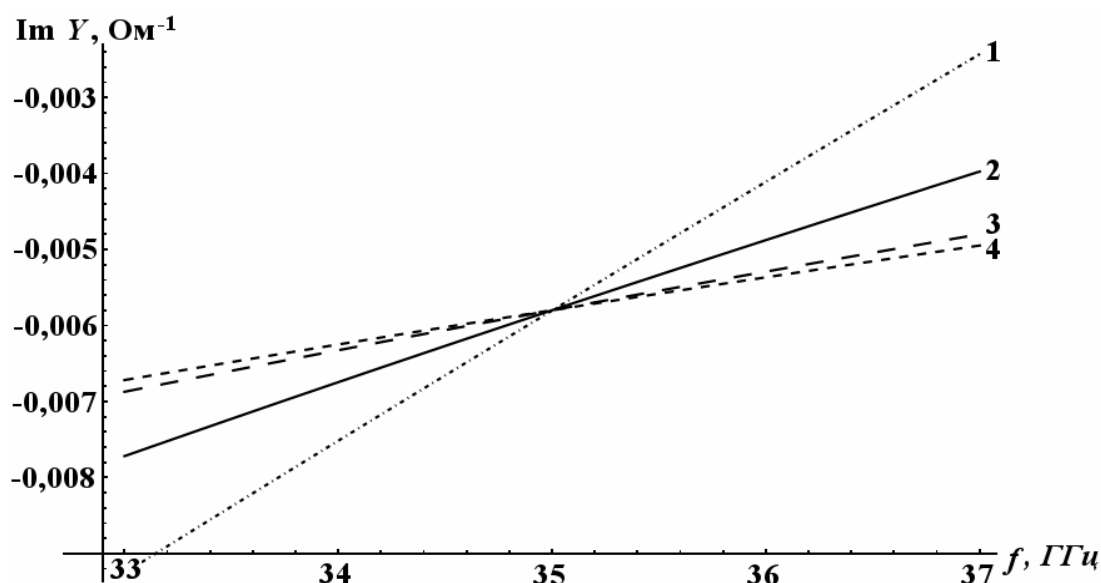


Рисунок 3 – Зависимость проводимости резонаторов различных форм от частоты:
 1 – щелевой резонатор; 2 – лопаточный резонатор с $\psi = 8,57^\circ$,
 типичный для классической АЗС; 3, 4 – лопаточные резонаторы с углами раскрыва
 $\psi = 44^\circ$ и $\psi = 64^\circ$ соответственно, типичные для АЗС на ВПГ.

Выделены следующие преимущества АЗС на ВПГ по сравнению с классическими АЗС:

- существенно (в $\sim 5 \div 9$ раз) больший угол раскрыва резонаторов, что позволяет говорить о меньшей длительности фронта модулирующего импульса, необходимой для стабильной работы КМ с такой АЗС, по сравнению с КМ с классической АЗС;
- в результате уменьшения количества резонаторов и, соответственно, щелей связи АЗС с СР значительно увеличивается формоустойчивость АЗС;
- благодаря существенному уменьшению количества резонаторов в АЗС на ВПГ (в 3 раза при сохранении коэффициента замедления) открывается путь для изготовления щелей связи профилирующим электродом и применения группировки щелей связи;
- уменьшение крутизны зависимости проводимости резонатора от частоты позволяет говорить об уменьшении перепада мощности по диапазону перестройки частоты.

В результате сделан вывод о целесообразности применения этого режима взаимодействия в КМ, особенно в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн.

Рассмотрен нагрев ламелей АЗС в КМ. Обоснована некорректность применения известных методов расчета тепловой нагрузки на ламели АЗС, приведенных в работе [4], и предложено использование программы [5] для расчета температуры ламелей. Выполнено моделирование классических АЗС и АЗС на ВПП и показано уменьшение суммарной температуры на торцах ламелей в АЗС последнего типа.

При создании КМ миллиметрового диапазона длин волн выполнение рекомендаций по проектированию СР, данных в работе [1] и связанных с выбором отношения внешнего диаметра СР D к внутреннему d , может вызвать потерю управляемости частотой вследствие слишком высокой плотности ее перестройки. Проанализированы факторы, на которые влияет выбор отношения D/d , и представлена зависимость взаиморасположения видов колебаний СР от этого отношения. Предложен новый подход для проектирования СР КМ миллиметрового диапазона длин волн, согласно которому D/d является функцией высоты СР h_{CP} на заданной частоте, позволяющий существенно снизить количество необходимых расчетов. Представлены рекомендации по выбору h_{CP} , позволяющие решить проблемы, связанные с потерей управляемости частотой, по крайней мере, в 4-мм диапазоне длин волн. Стабилизирующий резонатор при этом может являться отрезком коаксиального волновода, близкого к запредельному для волны типа H_{01} .

В третьей главе диссертации "Щелевой вид колебаний в коаксиальном магнетроне" рассмотрены вопросы расширения области применения комбинированного способа подавления щелевого вида колебаний, иначе называемого длинноволновым π видом (ДПВ).

Разработана модель для расчета параметров щелевого вида колебаний. С этой целью используется резонаторная система типа «восходящее солнце», в которой проводимость малых резонаторов на границе с пространством взаимодействия равна проводимости «закрытых» (со сплошной периферийной стенкой) резонаторов АЗС, а входная проводимость больших соответствует проводимости «открытых» резонаторов (нагруженных на щель связи). Для системы без группировки щелей связи радиальный размер всех больших резонаторов одинаков, в то время как в системе с применением щелей связи различного профиля радиальные размеры больших резонаторов будут различными.

Выполнен анализ методики расчета параметров щелей связи, предложенной в работе [1], выявлены и исправлены математические ошибки и неточности при выводе уравнений. Рассмотрены ограничения по применимости этой методики: ее использование корректно в случае «тонкой» (толщина которой не превышает $0,07\lambda_{раб}$) периферийной стенки АЗС.

Для расчета периферийных стенок АЗС толщиной более $0,07\lambda_{раб}$ («толстых») предложена волноводная методика. Выполнено сравнение результатов расчета по этим методикам, в результате которого выявлены следующие тенденции:

а) резонаторы, эквивалентные «открытым», практически всегда имеют больший радиальный размер, чем «закрытые». Обратная ситуация наиболее часто возникает при изготовлении периферийной стенки АЗС толщиной $\sim \lambda_g/4$ или больше; гораздо реже она может быть связана исключениями, описанными в пунктах в) и г);

б) расчет обеими методиками показывает, что уменьшение ширины щели связи приводит к приближению глубины резонаторов, эквивалентных «открытым», к глубине «закрытых» резонаторов;

в) практически во всех случаях с увеличением толщины периферийной стенки АЗС частота щелевого вида колебаний приближается к рабочему π виду. Анализ исключений показал, что график зависимости проводимости щели связи Y от толщины стенки АЗС t_{cm} носит монотонный характер, однако при расчете различными методами имеет разный угол наклона. При этом проводимость нагруженного на Y_t лопаточного резонатора $Y_{рез}(Y_t)$ нелинейно зависит от Y_t , что и приводит к описанным исключениям;

г) другая особенность характеристики $Y_{рез}(Y_t)$ заключается в том, что в некоторых ее точках наблюдаются крайне резкие скачки. При попадании в окрестность такой точки незначительное изменение параметров щели связи может привести к весьма заметным изменениям в глубине резонатора, эквивалентного «открытому», и даже добавлению мнимой части к величине глубины эквивалентного резонатора;

д) согласно методике Э.Д. Шлифера [1], уменьшение аксиальной протяженности щелей связи приводит к уменьшению глубины резонаторов, эквивалентных «открытым», а согласно волноводной методике – к увеличению. По-видимому, есть два фактора, влияющих на частоту в этом случае: уменьшение объема, в котором запасается энергия высокочастотного поля ДПВ, и изменение волноводной длины волны щели связи. В случае «тонких» стенок АЗС большее влияние оказывает первый фактор, а в случае «толстых» – второй.

Рассмотрена возможность применения для расчета параметров щелевого вида трехмерного моделирования в программных пакетах [6, 7], однако полученные результаты не позволяют рекомендовать их использование. Так, результаты расчета в программе [6] существенно отличаются от экспериментальных данных, а программный пакет [7] не позволяет рассчитывать параметры щелевого вида колебаний при применении гантельных щелей связи.

Предложен подход, применимый для расчета параметров щелевого вида колебаний при объединении щелей связи в группы и позволяющий оценивать степень «разрушения» спектра пространственных гармоник высокочастотного поля ДПВ. Это позволило провести расчет уровня диссипативных потерь щелевого вида колебаний при применении известных законов группировки щелей связи. В результате выделен наиболее эффективный способ – разделение щелей связи на две группы.

Массив проведенных расчетов позволил сделать вывод о том, что зависимость уровня диссипативных потерь от количества щелей связи в группах носит экстремальный характер, а количество длинноволновых щелей связи (глубина резонатора, эквивалентного «открытому» с такой щелью связи, больше глубины резонатора, эквивалентного «открытому» с щелью связи другого типа) должно составлять менее половины от общего количества щелей связи. Введен параметр обобщенной величины неоднородности $R_{неодн}$:

$$R_{неодн} = \frac{b_{э2}^2 - b_{э1}^2}{b_{э2}^2 - b^2} \frac{b_{э1}^2 - a^2}{b^2 - a^2}, \quad (1)$$

$$\text{для ламелей постоянной толщины } a = r_a - \frac{\tau}{2 \sin(\pi/N)}, \quad (2a)$$

$$\text{для конусных ламелей } a = \frac{\sin(\pi/N)}{\sin(\pi/N + \psi)} \left(r_a - \frac{\tau_a}{2 \tan(\pi/N)} \right), \quad (2б)$$

$$b = r_p - r_a + a, \quad (3)$$

$$b_э = r_э - r_a + a, \text{ где} \quad (4)$$

r_p – радиус по периферийной стенке «закрытого» резонатора;

$r_{э1}$ и $r_{э2}$ – радиусы по периферийной стенке резонаторов, эквивалентных «открытым» с различными щелями связи.

Применение параметра $R_{неодн}$ позволяет сократить объем расчетов, связанных с выбором геометрических параметров щелей связи и нахождением необходимого количества длинноволновых щелей связи, а также оценивать применимость полевого метода для расчета характеристик щелевого вида колебаний.

Исследовано не нашедшее ранее применения объединение в группы щелей связи прямоугольного профиля различной аксиальной протяженности. Согласно проведенным расчетам, эффективность «разрушения» спектра пространственных гармоник высокочастотного поля ДПВ при объединении в две группы таких щелей связи не уступает классическому способу (объединению в группы щелей связи гантельного и прямоугольного профилей). Это открывает путь для усиления подавления ДПВ за счет «разрушения» спектра пространственных гармоник его высокочастотного поля в КМ миллиметрового диапазона длин волн с классическими АЗС.

В результате оценки целесообразности применения комбинированного способа подавления ДПВ в АЗС на ВПГ сделан вывод о его перспективности в случае изготовления «тонких» периферийных стенок АЗС. При этом возможно как использование щелей связи различных профилей, так и только прямоугольного с различной аксиальной протяженностью.

Анализ КМ с «толстыми» периферийными стенками АЗС показал, что при использовании группировки щелей связи «разрушение» спектра пространственных гармоник высокочастотного поля ДПВ недостаточно, чтобы устранить конкуренцию с его стороны, и необходимо применять только диссипативный способ подавления щелевого вида колебаний.

В четвертой главе диссертации *"Метод проектирования колебательной системы коаксиального магнетрона миллиметрового диапазона длин волн"* проведен анализ трудностей, с которыми сталкиваются разработчики при создании КМ коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн и рассмотрены пути их преодоления.

На сегодняшний день фрагментарное состояние принципов проектирования КМ приводит к серьезным трудностям в процессе разработки КМ миллиметрового диапазона длин волн. В настоящей работе предложен метод проектирования колебательной системы КМ миллиметрового диапазона длин волн, основанный на следующих основных положениях:

1. Выбор типа и размеров катода. Одним из наиболее важных критериев при разработке современных магнетронов является величина долговечности. Поэтому первостепенной задачей является выбор типа и радиального размера катода. В качестве эмиттера наиболее целесообразно использовать металлосплавной эмиттер, который хорошо зарекомендовал себя в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн [8]. Известно, что в магнетроне 2-мм диапазона длин волн с напряжением анода $14,1 \div 14,5$ кВ металлосплавной катод при плотности тока 150 А/см^2 обеспечивает долговечность более 1000 часов (в опытных образцах – до 2000 часов) [8]. Поэтому при разработке КМ миллиметрового диапазона длин волн, удовлетворяющего современным требованиям по долговечности, необходимо выбирать размеры катода, позволяющие обеспечить плотность тока с него не более 150 А/см^2 .

2. Выбор типа АЗС. При выбранном уровне анодного напряжения АЗС должна обеспечивать минимально возможный уровень диссипативных потерь и соответствовать выбранным размерам катода. В рамках проектирования следует проводить анализ применимости как классической АЗС, так и АЗС на ВПГ, имеющих свои преимущества и недостатки. В коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн при выборе типа взаимодействия более выгодным представляется использование режима ВПГ.

3. Оценка теплового режима АЗС. Тепловая задача разделяется на две: определение средней температуры и импульсной добавки, а результирующая температура является их суммой. При превышении допустимых значений итоговой температуры за счет импульсной

добавки необходимо выполнять защиту ламелей тугоплавким металлом, либо (в случае рассмотрения классической АЗС) переходить к использованию режима ВПГ. В случае слишком высокого значения средней температуры наиболее целесообразным представляется применение «толстой» периферийной стенки АЗС.

4. Расчет параметров СР. Параметры СР по большей части (за исключением дисперсии видов колебаний) зависят от его аксиального размера h_{CP} на заданной частоте. Следует помнить, что при выбранной аксиальной протяженности нежелательно перекрытие поршнем перестройки щелей связи. Отношение внешнего диаметра СР к внутреннему D/d в 4-мм диапазоне длин волн может лежать в диапазоне $\sim 1,6 \div 2,3$, а в 2-мм – $\sim 1,4 \div 1,7$. В последнем случае выбор допустимых значений h_{CP} и D/d значительно осложняется увеличением влияния допусков отклонения номинальных размеров на частоту рабочего вида СР H_{011} , плотность перестройки частоты и дисперсию СР.

5. Оценка применимости группировки щелей связи с целью уменьшения вклада конкурирующей гармоники ДПВ в суммарное высокочастотное поле. При применении классической АЗС целесообразно исследовать возможность объединения в группы щелей связи прямоугольной формы с различной аксиальной протяженностью. При использовании АЗС на ВПГ дуга по периферийной стенке между соседними ламелями значительно увеличивается, что позволяет изготавливать щели связи профилированным электродом и открывает в миллиметровом диапазоне длин волн широкие перспективы по применению комбинированного способа подавления ДПВ. В случае использования АЗС с «толстыми» периферийными стенками необходимо применение диссипативного способа подавления ДПВ.

6. Конструкция вывода энергии. Несмотря на отсутствие нововведений в этом элементе, в работе выделен ряд рекомендаций, позволяющих улучшить воспроизводимость характеристик прибора.

Результатом проектирования по предложенному методу является законченный расчет электродинамических параметров прибора. Высокая мощность современных компьютеров и наличие значительного числа программ, предназначенных для моделирования перечисленных задач, позволяют сделать вывод о принципиальной возможности проводить машинное проектирование колебательной системы КМ, а результаты расчета могут являться основанием для вывода о возможности создания коротковолновых КМ.

По предложенному методу выполнено проектирование колебательной системы КМ 4-мм диапазона длин волн с низким уровнем выходной мощности (до 10 кВт в импульсе) и малой (сравнимой с магнетронами без СР и даже меньше) длительностью фронта модулирующего импульса. Также выполнено проектирование колебательной системы КМ 4-мм диапазона длин волн со средним уровнем выходной мощности (до 17 кВт в импульсе). Сде-

лан вывод об отсутствии непреодолимых трудностей при создании серийных образцов таких КМ. Приведены рекомендации по использованию различных режимов взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем и катодов различных диаметров в зависимости от уровня выходной мощности.

В заключении сформулированы основные результаты работы. Основным итогом диссертационной работы является решение актуальной задачи, заключающейся в разработке метода проектирования колебательной системы КМ коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, работающего при длительности фронта модулирующего импульса, сравнимой с магнетронами без СР. При решении поставленной задачи в работе разработаны модели, методы и программы для расчета различных параметров колебательной системы КМ. Особенностью работы является ее прикладная направленность, позволившая использовать полученные теоретические и экспериментальные результаты для решения конкретных научно-практических задач.

Основные результаты работы

1. В результате анализа причин, приводящих к нестабильной работе коаксиального магнетрона при длительности фронта модулирующего импульса, сравнимой с магнетронами без стабилизирующего резонатора, выделен наиболее эффективный способ их устранения – применение в коаксиальном магнетроне режима взаимодействия электронного потока с высшей пространственной гармоникой π вида колебаний. На основании массива расчетов и эксперимента в 8-мм диапазоне длин волн сделан вывод о целесообразности применения этого режима взаимодействия в коаксиальном магнетроне, особенно в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Впервые обнаружено, что зависимость диссипативных потерь в анодной замедляющей системе от угла раскрытия резонаторов при работе на высшей пространственной гармонике π вида имеет экстремальный характер с расположением максимума в районе $\sim 84^\circ$. Кроме того, выявлена сложная зависимость уровня диссипативных потерь от количества резонаторов анодной замедляющей системы.

2. Разработаны рекомендации по выбору геометрических параметров стабилизирующего резонатора коаксиального магнетрона миллиметрового диапазона длин волн, особенно коротковолновой его части. При расчете параметров стабилизирующего резонатора предложено использовать в качестве исходного параметра его аксиальную протяженность на заданной частоте вместо отношения внешнего диаметра к внутреннему. Это позволяет существенно снизить объем необходимых расчетов и экспериментов.

3. В результате анализа тепловой задачи в коаксиальном магнетроне предложены меры по уменьшению температурной нагрузки на торцы ламелей в случае превышения допустимых значений температуры. С этой целью выполнено сравнение тепловой нагрузки на ламели при применении классической анодной замедляющей системы и анодной замедляющей системы с использованием режима взаимодействия электронного потока с высшей пространственной гармоникой π вида колебаний, а также при изготовлении анодных замедляющих систем с «толстыми» и «тонкими» периферийными стенками. При этом обоснована некорректность применения известных методов расчета тепловой нагрузки на ламели замедляющей системы, приведенных в работе [4], связанная с тем, что не учитывается градиент температуры по периферийной стенке анодной замедляющей системы. Предложено использование программы [5] для расчета температуры на торцах ламелей.

4. Выбран наиболее эффективный способ усиления подавления щелевого вида колебаний посредством введения реактивного «разрушения» спектра его пространственных гармоник, что необходимо для устранения конкурирующего воздействия щелевого вида без ухудшения параметров рабочего вида. С этой целью предложена методика расчета степени «разрушения» спектра пространственных гармоник высокочастотного поля щелевого вида колебаний при использовании группировки щелей связи, оцениваемой по величине диссипативных потерь в анодной замедляющей системе при нормировании амплитуды π -видной гармоники к единице. Рассмотрены способы расчета входной проводимости щели связи по методике Э.Д. Шлифера. Представлены ограничения в использовании этой методики, связанные с рассмотрением щели связи как тонкой диафрагмы. Предложена новая (волноводная) методика расчета, применимая при рассмотрении группировки щелей связи в «толстой» периферийной стенке анодной замедляющей системы.

5. В результате анализа различных вариантов объединения щелей связи в группы, описанных в литературе, и расчета «разрушения» спектра пространственных гармоник высокочастотного поля щелевого вида колебаний при их применении расчетным образом подтвержден наиболее эффективный способ группировки – разделение щелей связи на две группы, отличающихся профилем либо размерами. На основании расчетов представлены рекомендации по составу этих групп. Представлены рекомендации по применению группировки щелей связи прямоугольного профиля различной аксиальной протяженности, эффективной в КМ миллиметрового диапазона длин волн, где изготовление щелей связи гантельного профиля приводит к уменьшению жесткости анодной замедляющей системы. В результате анализа целесообразности использования реактивного «разрушения» спектра пространственных гармоник высокочастотного поля щелевого вида колебаний при изготовлении «толстой»

периферийной стенки анодной замедляющей системы показана необходимость применения диссипативного способа его подавления.

6. Разработан метод проектирования колебательной системы коаксиального магнетрона миллиметрового диапазона длин волн, позволяющий, по крайней мере, в 4-мм диапазоне длин волн преодолеть трудности, возникающие при разработке коротковолновых коаксиальных магнетронов, и существенно отличающийся от приведенного в работе [1]. В методе предложен ряд рекомендаций, которыми разработчику следует руководствоваться при создании коаксиальных магнетронов миллиметрового диапазона длин волн, особенно коротковолновой его части – например, предпочтительность использования режима взаимодействия электронного потока с высшей пространственной гармоникой π вида колебаний и предложения по выбору геометрических параметров стабилизирующего резонатора. Результатом проектирования по предложенному методу является законченный расчет электродинамических параметров колебательной системы коаксиального магнетрона.

7. По предложенному методу выполнено проектирование колебательных систем коаксиальных магнетронов 4-мм диапазона длин волн с низким и средним уровнями выходной мощности и сделан вывод о возможности создания их промышленных образцов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Чистяков К.И., Омиров А.А.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611258 «Расчет дисперсионных характеристик магнетронов» («Magnetron dispersion calculator»). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.02.2011. Правообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)».
2. **Омиров А.А.** Электродинамика анодной замедляющей системы коаксиального магнетрона с реактивным подавлением щелевого вида колебаний, «Т-сomm – телекоммуникации и транспорт», №10, 2012. – С. 82 – 84.
3. **Омиров А.А., Гурко А.А.** О проектировании коаксиального магнетрона 4-мм диапазона длин волн, «Электронная техника», №4 (515), 2012. – С. 43 – 48.
4. **Омиров А.А.** О подавлении щелевого вида колебаний в коаксиальных магнетронах низкого уровня мощности, «Электронная техника», №4 (515), 2012. – С. 39 – 42.
5. **Омиров А.А., Гурко А.А.** О проектировании стабилизирующего резонатора коаксиального магнетрона 4-мм диапазона длин волн, «Наукоемкие технологии». – Т. 13, №12, 2012. – С. 14 – 16.

6. *Омиров А.А., Чистяков К.И., Скрипкин Н.И.* Разработка комплексов мер для устранения недостатков в работе магнетрона, Труды X межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». – М.: МГУ, 2010. – С. 46 – 51.
7. *Омиров А.А., Чистяков К.И., Скрипкин Н.И.* Разработка пакетированного магнетрона 2-мм диапазона длин волн с увеличенным сроком службы, Труды X межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». – М.: МГУ, 2010. – С. 52 – 58.
8. *Омиров А.А.* О помогающих видах колебаний коаксиального магнетрона, Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2010. – С. 301.
9. *Омиров А.А., Чистяков К.И.* Коаксиальный магнетрон 4-мм диапазона длин волн, Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2010. – С. 262 – 263.
10. *Омиров А.А.* Нетрадиционный подход к проектированию коаксиального магнетрона, Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2011. – С. 234 – 235.
11. *Омиров А.А., Чистяков К.И.* Метод сравнения резонаторных систем магнетронов типа «восходящее солнце» по диссипативным потерям, Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2011. – С. 238 – 240.
12. *Омиров А.А.* О продвижении коаксиального магнетрона в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн и теории помогающих видов, Труды XI межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». – М.: МГУ, 2011. – С. 178 – 182.
13. *Омиров А.А., Чистяков К.И.* Способы подавления щелевого вида колебаний в коаксиальном магнетроне, Труды XI межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». – М.: МГУ, 2011. – С. 185 – 190.
14. *Омиров А.А.* Анодная замедляющая система коаксиального магнетрона, Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, посвященная 50-летию МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2012. – С. 271 – 272.
15. *Омиров А.А., Нефедов В.Н.* Использование режимов синхронизации электронного потока с высшей пространственной гармоникой π вида для уменьшения длительности фронта модулирующего импульса коаксиального магнетрона, 67-я Всероссийская конференция с

международным участием «Научная сессия, посвященная Дню радио», доклады. – М., 2012. – С. 379 – 382.

16. *Омиров А.А.* О перспективах создания коаксиального магнетрона коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, Материалы конференции «22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо – 2012), т.1. – М., Киев, Минск, Севастополь, 2012. – С. 237 – 239.
17. *Омиров А.А.* О перспективах создания коаксиального магнетрона коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, «Радиофизика и электроника». – Т. 17, №4, 2012. – С. 76 – 79.
18. *Омиров А.А.* Подавление щелевого вида колебаний в коаксиальных магнетронах миллиметрового диапазона длин волн, Материалы конференции «22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» («КрыМиКо – 2012»), т.1. – М., Киев, Минск, Севастополь, 2012. – С. 233 – 236.
19. *Омиров А.А., Нефедов В.Н.* Об особенностях проектирования коаксиального магнетрона 4-мм диапазона длин волн, Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2012». – Саратов: СГТУ, 2012. – С. 94 – 99.
20. *Омиров А.А.* Подавление щелевого вида колебаний в коаксиальных магнетронах миллиметрового диапазона длин волн, «Радиофизика и электроника». – Т. 4(18), №1, 2013. – С. 81 – 85.

Цитируемая литература

1. Шлифер Э.Д. Расчет и проектирование коаксиальных и обращено-коаксиальных магнетронов. – М.: МЭИ, 1991. – 168 с.
2. Магнетроны сантиметрового диапазона, т.1. Перевод под редакцией С.А. Зусмановского. – М.: Советское радио, 1950. – 420 с.
3. Гурко А.А. Пути и средства совершенствования параметров магнетронов миллиметрового диапазона, дисс. на соискание ученой степени д.т.н. – М.: МИЭМ, 2004. – 247 с.
4. Самсонов Д.Е. «Основы расчета и конструирования многорезонаторных магнетронов». – М.: Советское Радио, 1966. – 224 с.
5. Comsol Multiphysics 4.3a, 2012.
6. Ansys Ansoft HFSS v.13, 2011.
7. CST STUDIO SUITE v.2011, 2011.
8. Скрипкин Н.И. Магнетроны 2-мм диапазона длин волн: Новые разработки компании «Плутон», «Электроника», №7. – Фрязино, 2011. – С. 86 – 87.

Лицензия ЛР № 020832 от «15» октября 1993 г.

Подписано в печать «23» апреля 2013 г. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1.

Тираж 100 экз. Заказ № 21. Типография издательства НИУ ВШЭ,
115054, г. Москва, ул. Малая Пионерская, д. 12.