

На правах рукописи

Нестеров

НЕСТЕРОВ Дмитрий Анатольевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОМОДОВЫХ
РЕЗОНАТОРНЫХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МНОГОЛУЧЕВЫХ СВЧ
ПРИБОРАХ КЛИСТРОННОГО ТИПА,
ПОСТРОЕННЫХ НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 05.27.02 - Вакуумная и плазменная электроника

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Саратов 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель:

Царев Владислав Алексеевич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Электронные приборы и
устройства» ФГБОУ ВО «Саратовский
государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.» (г. Саратов)

Официальные оппоненты:

Симонов Карл Георгиевич,
доктор технических наук, начальник
лаборатории и ученый секретарь Научно-
технического совета (НТС) АО «Научно-
производственное предприятие «Исток» им.
Шокина» (г. Фрязино, Московская область)

Золотых Дмитрий Николаевич,
кандидат технических наук, начальник отдела
перспективных исследований и новых
технологий, АО «Научно-производственное
предприятие «Алмаз» (г. Саратов)

Ведущая организация:

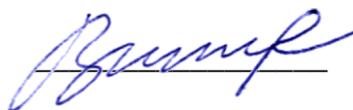
Саратовский филиал Института радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится «12» марта 2019 года в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ауд. 235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.rsgeu.ru ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.ф.-м.н., доц.



Литвинов В. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Мощные электровакуумные СВЧ приборы (ЭВП СВЧ) клистронного типа, благодаря высоким значениям мощности, коэффициента усиления и КПД по-прежнему востребованы и продолжают непрерывно совершенствоваться. В настоящее время к приборам клистронного типа предъявляются следующие требования: переход к терагерцовым частотам, повышение выходной мощности и КПД, миниатюризация, расширение рабочей полосы частот и улучшение эксплуатационных характеристик. Эти требования отражены в государственной программе РФ «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013 - 2025 годы» как «снижение в 4-5 р. стоимости мощных СВЧ усилителей с одновременным увеличением выходной мощности в 5-10 раз».

Одним из главных направлений развития клистронов, способных удовлетворить приведенные требования, является переход к многолучевым клистроном (МЛК) с двухззорными многоканальными полигармоническими резонаторами (ДМГР) и многоствольным клистроном (МСК) с ДМГР, в которых пролетные каналы расположены в нескольких пролетных трубах. Полигармонический режим позволяет полезно использовать эффект взаимодействия электромагнитного поля с высокочастотными полями высших гармоник, возбуждаемых в резонаторной системе (РС), что эффективно повышает КПД при одновременном уменьшении габаритов и массы клистронов.

Однако такие резонаторные системы характеризуются сложной трехмерной конфигурацией. Многомодовые режимы взаимодействия в МЛК мало исследованы, а их оптимизация при использовании 3D численного моделирования чрезвычайно трудоемка. При рассмотрении многомодового взаимодействия в известных работах рассматривались лишь упрощенные модели резонаторных систем. Подробные исследования картины нелинейной динамики ранее не проводились.

Приборам клистронного типа посвящены работы многих отечественных ученых: С. Н. Голубев, А.Д. Григорьев, С.С. Зырин, Ю.А. Кацман, Д.А. Комаров, А.Н. Королев, В.И. Пасманик, В.И. Пугнин, В.П. Сазонов, А.Н. Сандалов, К.Г. Симонов, И.А. Фрейдович, А.Э. Хайков, А.Н. Юнаков и др. Разработками МЛК занимались также зарубежные ученые: А. Дженсен, Б. Левуш, Дж. Кариотакис и др.

Необходимость в разработке и усовершенствовании современных приборов клистронного типа требует проведения комплексных исследований физических явлений, происходящих при многомодовом взаимодействии электронных потоков с СВЧ полем в многоствольных и многолучевых клистроном с двухззорными многоканальными полигармоническими резонаторами. Для новых типов резонаторных систем - фрактальных - требуется разработка методики их построения и изучение их свойств.

Обе приведенные научно-технические проблемы определяют актуальность диссертационного исследования, имеющую важное народно-хозяйственное и оборонное научно-техническое значение.

Область и объект исследований:

- Объектами исследования являются многолучевые и многоствольные усилительные и генераторные СВЧ приборы клистронного типа,
- Предмет исследования - многомодовые резонаторные системы и процессы взаимодействия в многолучевых и многоствольных клистроном.

Цель диссертационной работы: создание резонаторных систем для новых типов многоствольных и многолучевых клистронов, удовлетворяющих современным требованиям по комплексу массогабаритных и энергетических параметров.

Для достижения поставленных целей в работе решались следующие **задачи:**

1. Разработать методику проектирования МЛК, сочетающую 1D и 3D анализ, а также оптимизацию выходных параметров.

2. Исследовать комплекс параметров двухзворных многоканальных полигармонических резонаторов для устранения неоднородности СВЧ поля в разных каналах.

3. Разработать методику проектирования и алгоритм расчета новых типов резонаторов – квазифрактальных резонаторов.

4. Разработать методики настройки на кратные рабочие частоты и резонансные системы с их использованием.

5. Исследовать возможность создания МЛК с использованием двухзворных квазифрактальных резонаторов с КПД 80%.

6. Исследовать возможность улучшения выходных параметров мощного широкополосного клистрона X-диапазона.

7. Исследовать многолучевой монотронный автогенератор с четырехзворным резонатором в W-диапазоне частот.

8. Выработать рекомендации, повышающие выходные параметры клистронов без увеличения их массы и габаритов.

Методологическая основа исследований. Поставленные в работе задачи были решены с использованием различных программ, основанных на: 1D приближенных аналитических моделях с применением метода эквивалентных схем; 3D моделей пространственно-развитых резонансных структур, 1D дисковых моделях клистронов. Выдвинутые в данной работе теоретические положения обосновываются путем сравнения полученных результатов компьютерного моделирования с аналогичными результатами, полученными другими авторами, а также сравнением с экспериментальными данными.

Достоверность результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, основанного на уравнениях электровакуумной СВЧ электроники и законах электродинамики; сравнением с расчетными и экспериментальными данными, приведенных в отечественных и зарубежных публикациях по клистронам; а также соответствием данных компьютерного эксперимента результатам экспериментов, выполненных на предприятии АО «НПП «Контакт».

Научная новизна работы. Научная новизна результатов исследования теоретического характера заключается в следующем:

- Впервые разработана методика расчета и оптимизации резонаторов и многолучевых клистронов на их основе с применением программ с возрастающей степенью сложности расчетов, сочетающая 1D, 3D анализ и оптимизацию выходных параметров.

- Предложены методики частотно-независимой настройки на кратность частот $k=2$ в двухзворных двухчастотных резонаторах МЛК с использованием индуктивных стержней и проводящих держателей.

- Предложен критерий эффективности резонатора, позволяющий сравнить резонаторы МЛК по комплексу выходных электрических и массогабаритных параметров.

- Впервые создана методика построения внутренней конструкции двухзворных квазифрактальных резонаторов.

- Исследована возможность создания на 91 ГГц мощного многолучевого монотрона с четырехзворным резонатором. Прибор имеет выходную мощность 1.8 кВт и КПД в нагрузку 40%.

Научная новизна результатов исследования прикладного характера заключается в следующем:

- Предложена конструкция выходного клистронного резонатора с отдельными устройствами вывода энергии для кратных рабочих частот с независимыми элементами настройки (патент РФ № 153442).

- Обоснованы пути модернизации резонаторной системы однолучевого клистрона X-диапазона без увеличения продольной длины прибора за счет использования многозачорных двухчастотных резонаторов и двухтрубной РС.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту (соответствуют пунктам 1, 2, 3 паспорта специальности 05.27.02):

1. Блочно-иерархический подход к проектированию многолучевых клистронов с использованием комплекса программ моделирования с возрастающей степенью сложности, основанных на:

- приближенных аналитических моделях (для выбора оптимальных параметров рабочего режима МЛК);

- численных 3D моделях резонаторных систем (для анализа электродинамических параметров);

- одномерных дисковых моделях процессов взаимодействия с электронным потоком в клистропах (для определения выходных параметров прибора).

2. Среди исследованных полуволновых конструкций двухмодовых двухзачорных резонаторов для многолучевых клистронов с плотной упаковкой пролетных каналов, обеспечивающих оперативную настройку на кратность частот, равную двум, максимальную величину критерия миниатюризации (определяемого отношением эффективного характеристического сопротивления резонатора к массе резонаторной системы) имеют:

- двухзачорный выходной клистронный резонатор с независимой оперативной настройкой на рабочую частоту π -вида колебаний, реализуемой за счет изменения угла поворота держателя (патент РФ № 153442).

- двухзачорный резонатор с настройкой на вторую кратную частоту (2π -вид) за счет подбора поперечного размера цилиндрических индуктивных стержней.

3. Предложенная методика и алгоритм построения многоканальных двухзачорных резонаторов древовидного типа позволяют создать компактные многомодовые квазифрактальные резонаторы для мощных МЛК S-диапазона с выходной мощностью около 70-75 кВт и предельно высоким электронным КПД до 80%.

4. Увеличение выходных параметров клистрона X-диапазона, с непрерывной выходной мощностью 12 кВт и КПД 32%, возможно за счет:

- использования в конструкции группирователя многозачорных двухчастотных резонаторов, что повышает электронный КПД и выходную мощность на 11% при тех же габаритах и массе;

- двухствольной конструкции РС с двухзачорными резонаторами, в которой выходная мощность увеличивается на величину свыше 24 кВт при той же длине прибора.

Научная и практическая значимость диссертации заключается в следующем:

- Теоретическая значимость состоит в моделировании физических процессов многолучевых клистронов с многозачорными полигармоническими резонаторами сложной конфигурации, в исследовании проблем настройки этих резонаторов на кратность частот и в определении путей устранения неоднородностей СВЧ поля в пространстве взаимодействия резонаторов, в разработке методики конструирования нового типа резонаторов - двухзачорных фрактальных резонаторов.

- Практическая значимость заключается в выработке рекомендаций для модернизации резонаторной системы мощного СВЧ клистрона X-диапазона, повышающих надежность и энергоэффективность систем космической связи (акт внедрения). Результаты, полученные в данной работе, используются при выполнении гранта в рамках Всероссийского инновационного конкурса «УМНИК-2017».

- Практическая значимость также заключается в использовании разработанного макета двухзачорного двухчастотного резонатора в учебном процессе на кафедре

«Электронные приборы и устройства» СГТУ имени Гагарина Ю.А. (акт внедрения) при выполнении практических работ по дисциплине М.1.1.5 «Проектирование и технология электронной компонентной базы», изучаемой в рамках направления «11.04.04 Электроника и наноэлектроника». Двухззорный двухмодовый выходной клистронный резонатор (патент РФ № 153442) может быть использован в клистропах с выходной мощностью 10-15 кВт для СВЧ энергетики. Результаты исследований диссертации были использованы при выполнении гранта РФФИ № 16-07-00048 А «Моделирование электромагнитных явлений в СВЧ системе «фрактальный резонатор-многолучевой электронный поток».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 научно-технических конференциях и 5 конкурсах:

- Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 55-летию ОАО «НПП «Контакт» (ОАО «НПП «Контакт», Саратов, 2014);

- XXVII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-27» (СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2014);

- II международной научно-практической конференции «Инжиниринг техно 2014» (СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2014);

- XI международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014)» (СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2014);

- Всероссийской школы-конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы электроники СВЧ и ТГц диапазонов» (Пансионат «Волжские Дали», Село Пристанное, Саратовская область, 2015);

- Международной конференции «Science and Technology» (СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2015);

- XIII международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016)» (СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2016);

- III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы СВЧ электроники им. В.А. Солнцева 2017» (Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 2017);

- Всероссийских инновационных конкурсах «УМНИК-2015» (Весна, Осень), «УМНИК-2016» (Весна), «УМНИК-2017» (Осень) (Саратов);

- Всероссийском инженерном конкурсе студентов и аспирантов (ВИК) (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 2015).

Автор диссертации является победителем конкурса 2015 года на получение стипендии Президента РФ для молодых ученых и аспирантов, а также является победителем Всероссийского инновационного конкурса «УМНИК-2017».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 6 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 работы в единой реферативной базе данных Scopus и 1 патент на полезную модель.

Авторский вклад. Задачи исследования были сформулированы научным руководителем работы. Автору диссертации принадлежат следующие результаты: вывод соотношений, разработка алгоритмов и методик расчета, реализующих блочно-иерархический подход к проектированию многолучевых клистронов. Автором были выполнены численные расчеты для определения оптимальных режимов работы клистронов с многомодовыми резонаторами, настроенными на кратные рабочие частоты. Кроме того, вклад автора заключается в разработке алгоритма построения и методики оперативного расчета квазифрактальных двухззорных резонаторов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений, содержит 171 страницы, включая 32 таблицы, 125 рисунка, 86 формул, список литературы состоит из 103 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена актуальность темы диссертационной работы и показана степень ее разработанности, определены ее цели и задачи исследований, сформулированы положения и результаты, выносимые на защиту, продемонстрированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также указана апробация работы.

В **первой главе** приведен обзор научно-технической литературы по исследуемой теме диссертационной работы: были рассмотрены конструктивные решения полигармонических резонаторных систем и приборов клистронного типа, выполненных на их основе. Наиболее перспективными для повышения КПД в многолучевых клистронах (МЛК) являются двухззорные многоканальные полигармонические резонаторы (ДМГР), которые можно возбудить одновременно две или три кратных резонансных частоты, соответствующие основному (противофазному) и высшим (синфазным или противофазным) видам колебаний. Это позволит создавать приборы с наиболее высоким комплексом электрических и массогабаритных параметров.

Кроме того, в данной главе приведено описание методов расчета и программных средств, используемых при моделировании резонаторов и клистронов.

Вторая глава посвящена созданию методики оптимизации резонаторов и МЛК на их основе. Для сокращения трудоемкости их разработки в работе применен блочно-иерархический подход к проектированию РС МЛК, основанный на последовательном применении при расчете выходных параметров прибора аналитических и численных моделей процессов взаимодействия с электронным потоком с возрастающей степенью сложности.

На рисунке 1 представлен алгоритм, по которому проводилась оптимизация различных параметров, основанный на использовании 1D расчета и 3D анализа. На рисунке 1 используются следующие обозначения: f_n - частота n -го вида колебаний (ГГц), f_0 - частота основного вида колебаний (ГГц), k_f - показатель кратности частот, f_p - расчетная частота (ГГц), f_3 - заданная частота (ГГц), Δf - отклонение рассчитанной частоты от заданной (%), f_0 - рабочая частота (ГГц), N - число лучей, b/a - коэффициент заполнения канала электронным пучком, I_1/I_0 - относительная величина первой гармоники конвекционного тока, $\xi=U_1/U_0$ - коэффициент использования напряжения в выходном резонаторе, P_{OUT} - выходная мощность (кВт), η_c - контурный КПД (%), ρ - характеристическое сопротивление (Ом), Q_0 - собственная добротность, $p_{\mu 1}$ - микропервеанс одного луча (мкА/В^{3/2}), γa - угол пролета по радиусу канала (рад), γb - угол пролета по радиусу пучка (рад), η_e - электронный КПД (%), U_0 - ускоряющее напряжение (кВ), I_0 - ток луча (А), η_t - полный КПД (%), P_0 - подводимая мощность (Вт), γD - угол пролета двойного зазора (рад), γd - угол пролета одиночного зазора (рад), q - параметр пространственного заряда, a - радиус канала (мм), b - радиус пучка (мм), d - длина зазора (мм), l - длина втулки (мм), D - длина двойного зазора (мм), L - длина трубы дрейфа между торцами труб соседних резонаторов (мм), H - высота резонатора (мм), Z - расстояние между центрами соседних резонаторов, k_ρ - показатель степени неоднородности поля в пролетном канале, $(\rho M^2)_1$ и $(\rho M^2)_2$ - эффективное характеристическое сопротивление в двух контрольных точках пролетного канала (Ом), R - радиус резонатора (мм), Q_e - нагруженная добротность, G_e/G_0 - относительная активная электронная проводимость, B_e/G_0 - относительная реактивная электронная проводимость, df - расстройка частоты резонатора (МГц), Φ - фазовая траектория электрона, $Gain$ - коэффициент усиления (дБ), $\Delta f/f_0$ - относительная ширина полосы усиления.

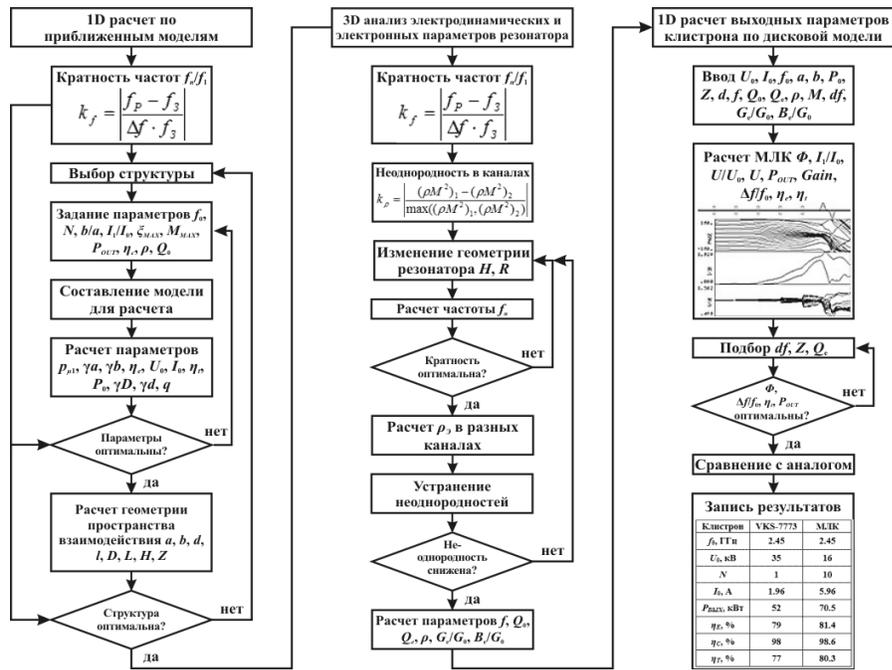


Рисунок 1 - Алгоритм оптимизации резонаторов и МЛК на их основе

Одним из исходных параметров в предложенной методике являлся радиус пролетного канала a , который для основной частоты выбирался из условия:

$$\gamma a = a(\beta_e^2 - k^2)^{1/2} \leq 1.3, \quad (1)$$

где $\beta_e = \omega_0/V_0$ - электронная постоянная распространения; $k = \omega_0/c$ - волновое число, $\omega_0 = 2\pi f_0$ - угловая частота; $V_0 = 5.93 \cdot 10^5 \sqrt{U_0}$ - скорость электронов.

Параметр γa определялся по эмпирической формуле:

$$\gamma a = 6.354 \cdot 10^{-4} \cdot \ln((f_0 + 0.65)^{275}) + 0.33 \quad (2)$$

Электродинамические параметры резонаторов определялись по результатам распределений поля в пространстве взаимодействия, полученных в программе 3D электродинамического моделирования REZON, разработанной в СГТУ.

Для вычисления электронных параметров использовалась методика, основанная на теории Вессель-Берга для медленных и быстрых волн пространственного заряда.

Для расчета электронного КПД η_e применялась полученная в настоящей работе приближенная аналитическая зависимость этого параметра от величины угла пролета по радиусу пучка и микроперванса (3):

$$\eta_e = \eta_{e \max} \cdot \left(0.11 \cdot \gamma b^{1/4} + \left(0.8464 - \left(\frac{0.562 \cdot \gamma b^{1/4}}{\sqrt{p_{\mu 1}}} - 1 \right)^2 \right)^{1/2} \right), \quad (3)$$

где

$$\eta_{e(\max)} = \frac{I_1/I_0}{(1.372 \cdot \gamma a + 1.35)}, \quad (4)$$

где $\eta_{e(\max)}$ - предельная величина электронного КПД.

Расчет контурного КПД и выходной мощности проводился по формулам (5) и (6):

$$\eta_c = 1 - \frac{0.5 \cdot \xi_{\max}^2 \cdot 10^6}{\eta_e \cdot p_{\mu 1} \cdot N \cdot U_0^{0.5} \cdot \rho \cdot Q_0}, \quad (5)$$

$$P_{out} = 10^{-6} \cdot \eta_e \cdot \eta_k \cdot p_{\mu l} \cdot N \cdot U_0^{2.5}, \quad (6)$$

Параметры, вычисленные по алгоритму, были сравнены с параметрами реального клистрона CPI VKS-7773 и параметрами, вычисленным в программе дисковой модели AJ DISK. Сравнение результатов показало, что предложенная методика расчета обеспечивает хорошую точность расчетов, приемлемую для инженерной практики.

Разработанный блочно-иерархический подход к проектированию РС многолучевых клистронов (МЛК) обеспечивает оперативное определение выходных параметров МЛК с требуемым набором характеристик и высокой точностью расчетов (погрешность не более 2-3%).

Третья глава посвящена исследованию двухзачорных многоканальных полигармонических резонаторов (ДМПР) с плотной упаковкой лучей в единой пролетной трубе, применение которых позволяет повысить КПД МЛК на 10-15% без увеличения его массы и габаритов.

Для повышения КПД МЛК обычно используют отдельный резонатор, настроенный на вторую гармонику входного сигнала. Однако в таких резонаторах появляются неоднородности в распределении высокочастотного (ВЧ) электрического поля в пролетных каналах, находящихся на разных расстояниях от центра резонатора, что ухудшает эффективность взаимодействия и уменьшает электронный КПД. Кроме того, настройка двухзачорных многоканальных полигармонических резонаторов одновременно на две рабочие частоты с заданной кратностью представляет собой чрезвычайно сложный процесс, как при численном моделировании, так и при практической реализации таких устройств.

Целью исследования ДМПР, представленных в настоящем разделе, являлось устранение этих недостатков для различных конструкций резонаторов.

Для выравнивания ВЧ электрического поля в различных каналах исследованных резонаторов (таблица 1) использовались следующие методы:

- удаление центрального канала с максимальной амплитудой поля (таблица 1, столбцы *a*, *в*);
- переход от конструкции резонатора с равными длинами зазоров к конструкции со ступенчато-неоднородной формой поперечного сечения втулки (таблица 1, столбец *б*, *г*).

Таблица 1. Конструкция и параметры исследуемых ДМПР

Вариант	<i>a</i>	<i>б</i>		<i>в</i>		<i>г</i>	
Модель							
<i>N</i>	6	36		6		8	
p_{μ} , мкА/ ^{B3/2}	0.3	0.3		0.25		0.2	
<i>U</i> ₀ , кВ	6	6		14		16	
η_t , %	66	65		67		67	
<i>P</i> _{OUT} , кВт	3.3	20		23.3		34.9	
<i>k</i> _m / <i>k</i> _{m(KP)}	8.8	11.5		4.9		1.5	
Оптимизация		до	после	до	после		
<i>k</i> _p (<i>f</i> ₁), %	-	15.5	13.3	7.4	7.5	-	-
<i>k</i> _p (<i>f</i> ₂), %	-	22.7	7.9	13	5.8	-	-

В таблице использованы следующие обозначения: *N* - число лучей; *p*_μ - микроперванс одного луча; *U*₀ - ускоряющее напряжение; η_t - технический КПД, *P*_{OUT} - выходная мощность; *k*_m - критерий эффективности резонатора по комплексу выходных

электрических и массогабаритных параметров, который сравнивается с этим же параметром для круглого резонатора $k_{m(KP)}$ (7); k_p - показатель степени неоднородности поля в пролетном канале на первой рабочей частоте $f_1 = 2.45$ ГГц противофазного вида колебаний и второй рабочей 2π -вида колебаний с частотой $f_2 = 4.9$ ГГц.

$$k_m = \frac{\rho M^2 (p_{\mu 1} N)^{4/5}}{HR^2} \cdot C, \quad C = \frac{1}{\pi \rho_{Cu} N_{cav}}, \quad (7)$$

где H и R - высота и радиус корпуса резонатора, ρ_{Cu} - плотность меди, N_{cav} - число резонаторов в клистроне.

В данной главе также приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований возможности настройки ДМПП на 2 кратные частоты, соответствующие основному (противофазному) и высшему (синфазному) видам колебаний с кратностью $k = 2$ с помощью различных элементов настройки.

Исследованные резонаторы могут быть использованы в МЛК для СВЧ нагрева с уровнем мощности от 3 кВт до 35 кВт с КПД в нагрузку от 60% до 70%. Среди исследованных полуволновых конструкций ДМПП с плотной упаковкой пролетных каналов, настроенных на кратность частот, равную двум, максимальную величину критерия миниатюризации имеют:

- двухззорный выходной клистронный резонатор (таблица 1, столбец *a*) с независимой оперативной настройкой на рабочую частоту π -вида колебаний, реализуемой за счет изменения угла поворота держателя (патент РФ № 153442).
- двухззорный резонатор (таблица 1, столбец *b*), в котором уменьшена неравномерность по эффективному характеристическому сопротивлению (ρM^2) на 2.2% на π -виде и на 14.8% на 2π -виде.
- двухззорный резонатор с независимой оперативной настройкой на вторую кратную частоту (2π -вид) за счет подбора поперечного размера цилиндрических индуктивных стержней.

В четвертой главе приведены результаты исследования новых типов резонаторов - двухззорных квазифрактальных резонаторов (ДКФР), которые перспективны для применения в высокоэффективных МЛК с многочастотными резонаторами. Цель данной главы - разработка методики построения таких резонаторов. Она основана на методах фрактальной электродинамики. Приведенные в настоящей главе квазифракталы относятся к классу древовидных фракталов, в которых можно выделить древовидную «крону» и «ствол».

«Крона» строилась поэтапно (рисунок 2). В качестве основы выбирался треугольник, вписанный в окружность с радиусом, равным радиусу пролетной трубы ($n = 1$). Затем треугольник путем поворота преобразовывался в многогранник ($n = 2 - 3$). Далее на продолжении двух граней проводились две линии до их пересечения ($n = 4$). Полученный фрагмент - основа для следующих самоподобных построений. На пятой итерации ($n = 5$) создавалась копия этого фрагмента в масштабе k , которая, после отражения, соединялась с точкой пересечения линий. Копируя полученный фрагмент, получили квазифрактал с числом копий, равным числу лучей ($n = 6$). Для формирования ствола центральный многогранник преобразовывался в вытянутую в продольном направлении призму. Для формирования резонатора создавался корпус, состоящий из двух крышек с пролетными отверстиями и полого цилиндра, в который помещалось квазифрактальное «дерево».

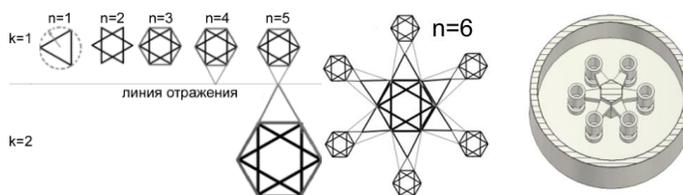
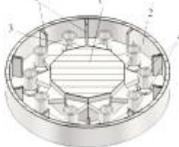
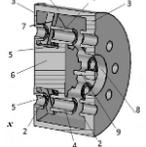
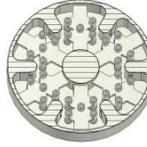


Рисунок 2 – Алгоритм построения кроны ДКФР

В таблице 2 приведены ДКФР, исследуемые в настоящей главе.

Таблица 2. Конструкция и параметры ДКФР

Вариант	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>
Модель						
N , лучей	4	10	6	8	10	30
a , мм	4.3	3.45	1.75	1.75	2.5	5.05
d , мм	9	3.75	2.8	2.8	3.75	7.6
l , мм	14	10.5	8.1	9.25	11.5	23.2
f_1 , ГГц	1.184	2.45	2.45	2.45	2.45	0.915
f_2 , ГГц	3.553	4.9	4.9	-	-	1.83
$\rho M^2(f_1)$, Ом	84.3	19.0	71.6	37.7	26.8	13
$\rho M^2(f_2)$, Ом	3.5	7.7	25.3	-	-	5.2

Проведенное моделирование позволило установить, что в одномодовом режиме возбуждения двухззорные квазифрактальные резонаторы, по сравнению с одноззорным резонатором, при одинаковых параметрах взаимодействия, имеют в 1.4 раза меньшие поперечные размеры, что позволяет уменьшить массу и габариты клистрона. В многомодовом режиме возбуждения ДКФР одновременно на нескольких кратных гармониках в МЛК можно использовать режим широкой полосы или режим высокого КПД.

Сравнение выходных параметров клистрона с ДКФР, рассчитанных по приближенному анализу и в программе дисковой модели AJ Disk показали, что максимальная погрешность составляет 2.5% для общего КПД. Остальные параметры имеют еще меньшую погрешность, что обеспечивает достаточную адекватность алгоритма для расчета МЛК.

Приведенная методика построения ДФКР позволяет создать компактные многочастотные резонаторы, работающие в режиме широкой полосы и предельно высокого КПД, позволяя создать МЛК S-диапазона с выходной мощностью до 75 кВт и КПД до 80%.

Пятая глава посвящена улучшению выходных параметров шестирезонаторного клистрона для систем связи X-диапазона (7.2 ГГц) «Веста» (рисунок 3) и разработке нового СВЧ прибора - многолучевого автогенератора W-диапазона (91 ГГц). Исходный клистрон-аналог при ускоряющем напряжении $U_0=16$ кВ, токе луча $I_0=2.3$ А и радиусе трубы дрейфа $a=1.8$ мм обеспечивает выходную мощность около 12 кВт в непрерывном режиме и полосу усиления около 100 МГц.

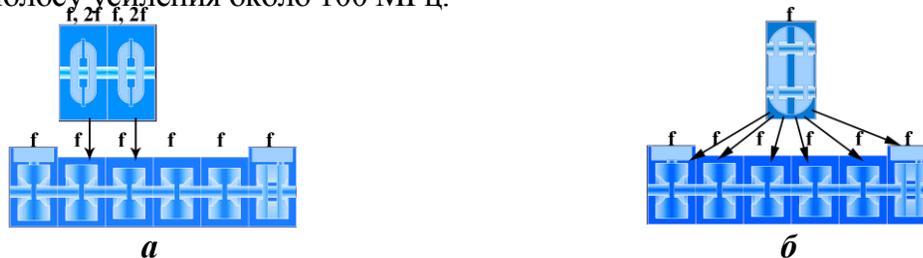


Рисунок 3 - Модификации РС мощного широкополосного клистрона: а - Веста-2, б - Веста-Д

Для дальнейшего улучшения характеристик систем связи требуется улучшения параметров его резонаторной системы, для получения более широкой полосы, повышенного КПД и уровня выходной мощности без существенного изменения продольных габаритов и конструкции прибора.

В данной главе приведены результаты 3D электродинамического моделирования, а также результаты экспериментальных исследований опытных макетов различных модификаций резонансных систем:

- двухззорные резонаторы (рисунок 3, а) с двухмодовым возбуждением на кратных частотах π - и 2π -видов колебаний (Веста-2);
- двухтрубные резонаторы (рисунок 3, б) на 2π -виде для двухствольного прибора (Веста-Д).

В таблице 3 приведены результаты сравнения основных показателей различных конструкций клистрона с отечественными и зарубежными аналогами в X-диапазоне.

Таблица 3. Сравнение параметров клистронов

	Кол-во «стволов»	Выходная мощность, кВт	Электронный КПД, %	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток луча, А	Микропервееанс одного луча, мкА/В ^{3/2}	Кратность частот	Кол-во заторов
Веста	1	11.6	31.6	16	2.3	1.24	1	1
Веста-2	1	12.9	35.1	16	2.3	1.24	2	2
Веста-3	1	12.9	35.1	16	2.3	1.24	2	3
КУ-379	1	12.5	27	12.6	3.7	2.62	1	1
VKX-7753G	1	12.5	29	13.5	3.2	2.04	1	1
Веста-Д	2	27.4	37.2	16	2.3*2	1.24	1	2
VA-876J	1	25	25	25	4	1.01	1	1

Из таблицы видно, что выходные и эксплуатационные параметры исследованных клистронов существенно выше параметров современных отечественных и зарубежных аналогов.

Показано, что увеличение выходных параметров клистрона «Веста» возможно за счет:

- использования в конструкции группирователя многоззорными двухчастотных резонаторов, что повышает электронный КПД и выходную мощность на 11% при тех же габаритах и массе;
- двухствольной конструкции РС с двухззорными резонаторами, в которой электронный КПД увеличивается на 18%, а выходная мощность на величину свыше 24 кВт при той же длине прибора.

В данном разделе также приведены результаты исследования возможности создания на частоте 91 ГГц простого по конструкции мощного многолучевого монотрона миллиметрового диапазона длин волн с четырехззорным резонатором, возбуждаемым на π -виде колебаний (рисунок 4).

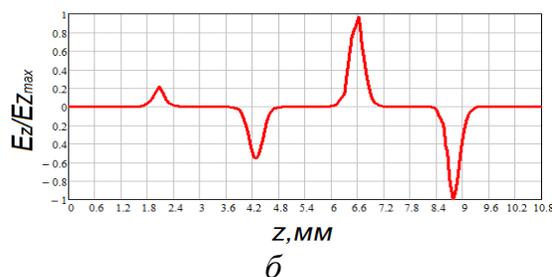
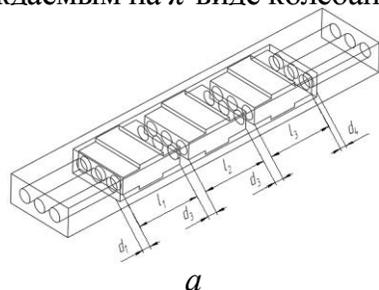


Рисунок 4 - Конструкция резонатора (а), распределение нормированной напряженности электрического поля вдоль пространства взаимодействия (б)

В результате проведенного 3D моделирования были определены следующие параметры резонатора: радиус пролетного канала $a=0.2$ мм, длины зазоров ($d_1=0.135$ мм, $d_2=0.293$ мм, $d_3=0.308$ мм, $d_4=0.138$ мм) и пролетных труб ($l_1=l_2=l_3=2$ мм), величина характеристического сопротивления $\rho=70$ Ом и собственная добротность $Q_0=3646$. На рисунке 4, б представлена функция распределения поля $E_{zi}/E_{z\max}$, нарастающая в продольном направлении пространства взаимодействия.

Результаты расчета в программе EXPRAN показали, что исследуемый монотрон при ускоряющем напряжении порядка 25 кВ, плотности тока катода $J_k=80$ А/см² и полном токе $I_{0\Sigma}=I_{01}\cdot N=0.195$ А, обеспечивает общий КПД в нагрузку 38% и выходную мощность 1.8 кВт.

За счет высокого электронного КПД такой прибор простой конструкции может заменить генераторный клистрон распределенного взаимодействия более сложной конструкции.

В **заключении** работы сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, обосновываются перспективы использования примененных в исследованиях компьютерных моделей и методик моделирования резонаторов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Разработка и усовершенствование приборов клистронного типа, проведенная в рамках данной диссертационной работы, направлена на удовлетворение современных требований к данным приборам для гражданского и военного применений.

В ходе выполнения работы было сделано следующее:

1. Разработана методика проектирования и оптимизации МЛК, использующая приближенные аналитические и строгие численные модели резонаторов, а также модели процессов взаимодействия в МЛК, высокая точность методики была доказана сравнением с экспериментальными данными клистрона VKS-7773.

2. Найден комплекс электронных, электрических и электродинамических параметров численных 3D моделей двухзазорных многоканальных полигармонических резонаторов с плотной упаковкой лучей в единой пролетной трубе, возбуждаемых на кратных π - и 2π -видах колебаний, обеспечивающий эффективное взаимодействие ВЧ поля с электронным потоком без самовозбуждения. Определены условия, при которых неравномерность ВЧ поля на синфазном высшем виде колебаний в различных пролетных каналах, находящихся на разном расстоянии от центра коаксиальных резонаторов может быть снижена в 1.5-2 раза.

3. Предложена новая конструкция выходного клистронного резонатора с отдельными устройствами вывода энергии для первой и второй кратной рабочих частот, каждая из которых настраивается отдельно с помощью независимых элементов настройки, за счет чего упрощается настройка на кратность $k=2$ (патент РФ № 153442).

4. Предложен критерий эффективности резонатора по комплексу выходных электрических и массогабаритных параметров и проведено сравнение данного параметра для различных конструкций двухзазорных многоканальных полигармонических резонаторов, отличающихся числом лучей, формой торцевых поверхностей пролетных труб, образующих двойной зазор и конструкцией элементов независимой настройки на кратные частоты.

5. Предложена методика построения новых типов пространственно-развитых резонаторов - двухзазорных квазифрактальных резонаторов древовидного типа, отличающихся возможностью работы в многомодовом режиме при меньших габаритах и повышенном комплексе выходных параметров, обеспечивающих достижение электронного КПД 85-90%.

6. Определены оптимальные конструктивные варианты и выработаны рекомендации для модернизации клистрона X-диапазона с уровнем выходной мощности около 12 кВт. Показано, что применение в группирователе клистрона многозачорных двухчастотных резонаторов вместо однозачорных одночастотных позволяет увеличить выходную мощность и КПД на 10-11%; а использование двухтрубной резонансной системы повышает электронный КПД на 18% и выходную мощность в 2.4 раза. При этом продольная длина клистрона остается неизменной.

7. Впервые исследована возможность создания на частоте 91 ГГц высокоэффективного трехлучевого монотронного автогенератора с четырехзачорным резонатором, работающем на π -виде колебаний. Установлено, что в таком, простом по конструкции, приборе, при оптимально подобранной (нарастающей) функции распределения поля в пространстве взаимодействия и напряжении 25 кВ можно получить КПД около 40% и выходную мощность 1.8 кВт.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

*Публикации в центральных изданиях,
включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ*

1. Нестеров, Д.А. Выравнивание параметров взаимодействия в двухззорном двухмодовом резонаторе низковольтного многолучевого клистрона / Д.А. Нестеров, В.А. Царев // Радиотехника. - 2014. - № 10. - С. 53-56.
2. Нестеров, Д.А. Двухмодовый режим работы двухззорного многоканального цилиндрического резонатора, нагруженного индуктивными стержнями / Д.А. Нестеров, В.А. Царев // Антенны. - 2014. - № 12. - С. 56-61.
3. Нестеров, Д.А. Многолучевой автогенератор W-диапазона с резонатором распределенного взаимодействия / Нестеров, Д.А., В.А. Царев, О.А. Горлин // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). - 2015. - № 12. - С. 3.
4. Царев, В.А. Компьютерное моделирование многолучевого монодрона W-диапазона с резонатором распределенного взаимодействия / В.А. Царев, Д.А. Нестеров // Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2015. - № 4 (81). - С. 62-68.
5. Нестеров, Д.А. Новый класс квазифрактальных двухззорных резонаторов для многолучевых клистронов / Д.А. Нестеров, В.А. Царев // Радиотехника. - 2016. - №7. - С. 87-91.
6. Нестеров, Д.А. Моделирование процесса взаимодействия многолучевого электронного потока с СВЧ-полем в квазифрактальном двухззорном выходном резонаторе клистрона / Д.А. Нестеров, В.А. Царев, В.Ю. Мучкаев // Радиотехника. - 2017. - №7. - С. 31-36.

Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ и патенты

7. Пат. 153442 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 J 23/18. Двухззорный выходной клистронный резонатор / Нестеров Д.А., Царев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГТУ имени Гагарина Ю.А.». - № 2014142657/07; заявл. 22.10.2014; опубл. 20.07.2015, Бюл. № 20. - 20 с.: ил.

Издания, входящие в базу цитирования Scopus

8. Нестеров, Д.А. Выходной двухззорный резонатор многопучкового клистрода с бигармоническим полем = Output two-gap cavity for multibeam klystron with biharmonic field / Д.А. Нестеров, Д.В. Ким, В.А. Царев // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014: материалы 11-й междунар. науч.-техн. конф., г. Саратов, 25-26 сент. 2014 г. = 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2014): Conference Proceeding, Saratov, September 25-26, 2014. / СГТУ - Саратов, 2014. - Т.1. - С. 90-93.
9. Нестеров, Д.А. Оптимизация параметров двухмодовых квазифрактальных двухззорных резонаторов для мощных многолучевых клистронов, работающих на частоте 2.45 ГГц = Optimization of parameters dual mode quasi-fractal double-gap cavities for high-power multi-beam klystrons, operating at a frequency of 2.45 GHz / Д.А. Нестеров, В.А. Царев // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016: материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф., г. Саратов, 22-23 сент. 2016 г. = 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE' 2016): Conference Proceeding, Saratov, September 22-23, 2016. / СГТУ - Саратов, 2016. - Т.1. - С. 349-358.

Публикации в других изданиях

10. Нестеров, Д.А. Исследование электронных и электродинамических характеристик двухззорного резонатора многолучевого клистрона в режимах одновременного взаимодействия на основном и высших видах колебаний / Д.А. Нестеров, В.А. Царев // Материалы всерос. науч.-техн. конф., посвященной 55-летию ОАО «НПП «Контакт». Саратов, 19 февраля 2014 г. / ОАО «НПП «Контакт». - Саратов, 2014. - С. 78-82.
11. Нестеров, Д.А. Исследование полигармонического двухззорного резонатора многолучевого клистрона / Д.А. Нестеров, В.А. Царев // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ 2014: материалы XXVII международной научной конференции: Саратов, апрель 2014 г. / СГТУ. - Саратов, 2014. - С. 136-138.
12. Нестеров, Д.А. Исследование характеристик щелевого двухззорного резонатора многолучевого двухчастотного СВЧ прибора / Д.А. Нестеров, В.А. Царев // Инжиниринг техно 2014: сб. тр. 2-й междунар. науч.-прак. конф.: в 2 т. Саратов, 30 июня - 1 июля 2014 г. / СГТУ. - Саратов, 2014. - Т.2. - С. 57-60.
13. Nesterov, D. A. Improving of output parameters of klystron type devices due to multimode interaction mode / D. A. Nesterov ; науч. рук. V. A. Tsarev ; конс. По языку А. V. Vozdvizhenskaya // Science and Technology proceedings of the International conference 2015, 14-16 May 2015, Saratov, Russia = Наука и техника современные направления материалы междунар. науч.-практ. конф., 14-16 мая 2015 г., г. Саратов. - Саратов, 2015. - Р. 86-89.
14. Нестеров, Д.А. Трехмерное моделирование двухззорного резонатора мощного многолучевого монотрона с кратными частотами для промышленного СВЧ нагрева / Д.А. Нестеров, В.А. Царев // Вопросы электротехнологии. - 2015. - № 4(9). - С. 58-63.
15. Нестеров, Д.А. Перспективы применения двухззорных квазифрактальных резонаторов в мощных многолучевых клистронах с предельно высоким КПД / Д.А. Нестеров, В.А. Царев // Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы СВЧ электроники им. В.А.Солнцева 2017». 8-9 ноября 2017 г. / НИУ «Высшая школа экономики». - Москва, 2017. - С. 7-9.

Нестеров Дмитрий Анатольевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОМОДОВЫХ
РЕЗОНАТОРНЫХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МНОГОЛУЧЕВЫХ СВЧ
ПРИБОРАХ КЛИСТРОННОГО ТИПА, ПОСТРОЕННЫХ
НА ИХ ОСНОВЕ

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать
Формат 60×84/16
Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.