

На правах рукописи



Ремизова Татьяна Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ КЛИСТРОНОВ
С ГЕНЕРАТОРНОЙ СЕКЦИЕЙ НА ДВУХАЗОРНОМ РЕЗОНАТОРЕ**

Специальность 05.27.02 – «Вакуумная и плазменная электроника»

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Рязань – 2015

Работа выполнена на кафедре «Электронные приборы» в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель:

Федяев Валерий Кузьмич,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Электронные
приборы» ФГБОУ ВПО «Рязанский
государственный радиотехнический
университет» (г. Рязань)

Официальные оппоненты:

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

Байков Андрей Юрьевич, кандидат
технических наук, заведующий
кафедрой «Общие математические и
естественнонаучные дисциплины»
АОЧУ ВО «МФЮА» (г. Москва)

Ведущая организация:

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Защита диссертации состоится «29» 09 2015 г. в 11⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в зале ученого совета в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, ауд. 235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.rsreu.ru> ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.211.03
доктор физико-математических наук,
профессор

Чиркин Михаил Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время появилась потребность в простых по конструкции и относительно дешевых автогенераторах СВЧ для микроволновых технологий и СВЧ нагрева, в частности, для разогрева нефтяных пластов и плазмы в установках термоядерного синтеза. Перспективными приборами для таких применений признаны прямопролетные генераторы клистронного типа на одном резонаторе (монотрон) с одним или несколькими СВЧ зазорами.

Следует отметить, что первым прибором клистронного типа был автогенератор на двухзазорном резонаторе, описанный в 1935 г. в статье А. Арсеньевой и О. Хейль и реализованный в 1936 г. в ЛЭТИ Ю.А. Кацманом. В последующем исследованием и разработкой автогенераторов монотронного типа за рубежом занимались О. Neil, F. Lewellin, A. Bowen, A. Witt, X. Holman, J.J. Muller, E. Rostas, в СССР и России – С.Д. Гвоздовер, Д.М. Петров, Л.Н. Лошаков, Ю.А. Кацман, А.А. Тув, В.А. Солнцев, А.А. Кураев.

В последние годы работы в этом направлении активно ведутся в Национальном ядерном центре Бразилии под руководством J.J. Barroso, в Саратовском государственном техническом университете (СГТУ) под руководством профессора В.А. Царева, в Рязанском государственном радиотехническом университете (РГРТУ). Так в РГРТУ под руководством профессора В.П. Панова был разработан, а в АО «НПП «Исток» им. Шокина» впервые изготовлен и испытан многолучевой монотрон сантиметрового диапазона с длиной волны $\lambda=5.5$ см на одном резонаторе с одним широким зазором на выходную импульсную мощность 104 кВт с КПД 12.5%. В кандидатской диссертации О.А. Горлина численным моделированием была показана возможность получения в генераторе на двухзазорном резонаторе КПД 44% с выходной непрерывной мощностью 3.7 кВт.

Для широкого производства и коммерческой реализации таких автогенераторов необходимо довести КПД по мощности в нагрузке до уровня 50% и более. Это возможно сделать добавлением усилительного каскада из пролетной трубы и выходного резонатора. Увеличение первой гармоники конвекционного тока и, соответственно, КПД в таком клистроне происходит за счет догруппировки электронов после генераторной секции. Кроме того, в таком генераторно-усилительном клистроне (ГУК) устраняется влияние нагрузки на работу генераторной секции.

Степень разработанности темы. Первые упоминания о ГУК относятся к 70-м годам прошлого столетия, в них автогенерация осуществлялась введением внешней обратной связи между одним из промежуточных резонаторов и входным резонатором.

Исследуемые в диссертации двухрезонаторные ГУК с генераторной секцией на двухзазорном резонаторе имеют ряд преимуществ перед другими СВЧ приборами того же назначения, поэтому проведение оптимизационных расче-

тов двухзазорных ГУК, в том числе и многолучевых, является **актуальной задачей**.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационной работы заключается в разработке эффективного метода, модели и алгоритма расчета электронных процессов в нелинейных режимах на основе методики самосогласованного поля, а также в исследовании процессов взаимодействия в ГУК с генераторной секцией на двухзазорном резонаторе для определения режимов, обеспечивающих увеличение КПД до уровня более 50%.

Для достижения поставленной **цели** необходимо было решить следующие основные **задачи**.

1. Провести анализ известных приборов клистронного типа простой конструкции, существующих методов расчета процессов взаимодействия электронов с полями зазоров резонаторов.

2. Разработать методику, алгоритм и программное обеспечение для оперативного расчета в самосогласованном режиме процессов взаимодействия в ГУК.

3. Использовать разработанную методику и программу для исследования электронной проводимости зазора в нелинейном режиме.

4. Провести моделирование физических процессов в ГУК для получения научно-обоснованных рекомендаций по выбору геометрических размеров, режима и параметров области взаимодействия ГУК.

5. Исследовать с использованием программ разного уровня возможность увеличения КПД двухзазорного трехрезонаторного ГУК.

6. Сопоставить расчетные и экспериментальные значения КПД клистрода с двухзазорным промежуточным резонатором в режиме самовозбуждения.

7. Оптимизировать параметры генераторной и усилительной секций для получения предельно возможных КПД ГУК на базе многолучевого клистрона сантиметрового S-диапазона.

Научная новизна. В работе получены следующие научные результаты.

1. Математическим моделированием установлено, что в совмещенном режиме генерации и скоростной модуляции в фазе, обеспечивающей догруппировку электронов после генераторной секции на двухзазорном резонаторе, расстояние между серединами зазоров генераторной секции должно быть увеличено по сравнению с расстоянием для центров первой зоны генерации π -вида с 7.8 рад до 8.2 рад и для первой зоны генерации 0-вида колебаний с 11 рад до 12 рад.

2. Для реализации и ускорения вычислительного процесса установления напряжений на зазорах резонаторов в самосогласованном режиме введен параметр нижней релаксации, определены оптимальные значения этого параметра, зависящие от нормированной величины эквивалентного сопротивления резонаторов.

3. В оптимизированном по КПД ГУК возможно достижение электронного КПД 70% на первой зоне π -вида колебаний генераторной секции за счет до-

полнительного группирования электронов в длинных зазорах с углами пролета в первом зазоре 4.8 рад и 4 рад во втором с минимальным разбросом скоростей.

4. Численным моделированием установлено, что при амплитудах переменного напряжения больше ускоряющего в отличие от имеющихся представлений о монотонном уменьшении активной составляющей электронной проводимости СВЧ зазора до нуля при стремлении угла пролета в зазоре к нулю эта зависимость имеет более сложный вид: к нулю электронная проводимость стремится только при бесконечном возрастании нормированной амплитуды переменного напряжения.

5. Получено аналитическое соотношение для зависимости электронной проводимости от амплитуды переменного напряжения на зазоре, в соответствии с которым электронная проводимость обращается в нуль при нулевом и бесконечном значении нормированной амплитуды и имеет максимум, равный $0.32G_0$ при амплитуде $U_m = 1.41U_0$, где $G_0 = I_0/U_0$ – проводимость электронного потока; полученное соотношение может служить *новым тестом* при проверке в *нелинейных режимах* методик и программ, моделирующих электронные процессы в СВЧ зазорах и включающих: решение уравнений движения электронов, расчет наведенных токов, гармонический анализ Фурье, расчет электронной проводимости.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработаны алгоритм и программа «RAFT» для оперативного теоретического и практического анализа ГУК в самосогласованном режиме.

2. Для проведения расчетов ГУК в самосогласованном режиме получены зависимости оптимальных значений коэффициента нижней релаксации по напряжению от величины нормированного эквивалентного сопротивления резонатора R_z^n ; в пределах изменения R_z^n от 2 до 3.4 для π -вида и от 3.6 до 5.1 для 0-вида колебаний эти зависимости с погрешностью менее 1% аппроксимируются уравнениями прямых.

3. Для визуализации электронных процессов во времени и пространстве была разработана подпрограмма «GRAF», которая включена в состав программ двумерного моделирования пролетных клистронов «MEP-GR» и «MED(SCM)».

4. Определены размеры и режимы двухзазорных резонаторов, обеспечивающие догруппировку сгустка после генераторной секции; для практического применения рекомендована первая зона π -вида колебаний, когда при угле пролета в первом зазоре 4.7 рад, во втором 2.7 рад, длине трубы между зазорами 4.6 рад и амплитуде переменного напряжения $1.3U_0$ амплитуда первой гармоники конвекционного тока в пространстве догруппировки составила $1.75I_0$, что в 1.5 раза больше значения $1.16I_0$ для двухрезонаторного клистрона.

5. Показано, что при использовании режима догруппировки для трехрезонаторного ГУК на двухзазорных резонаторах, выбранного в качестве образца, возможно увеличение КПД с 10% до 41% в трехрезонаторной конструкции и до 36% в уменьшенной двухрезонаторной конструкции при сохранении исходных продольных габаритных размеров резонаторных секций.

6. Даны рекомендации по размерам и режимам оптимизированной по КПД конструкции ГУК на базе 18-лучевого клистрона. Электронный КПД 70% был получен на π -виде колебаний двухззорного резонатора при углах пролета в зазорах генераторной секции 4.8 рад и 4 рад; длине трубы между ними 3.6 рад; с углом пролета в зазоре одноззорного выходного резонатора 1 рад; длине трубы между резонаторами 5.3 рад; амплитудах напряжений на всех зазорах $1.1 U_0$; выходной импульсной мощности 104 кВт.

Методология и методы диссертационного исследования. В процессе выполнения данной диссертационной работы были использованы основы математического анализа и микроволновой электроники, компьютерные методы моделирования и программирования. Исследования проводились компьютерным моделированием с использованием технологий объектно-ориентированного и модульного программирования среды Visual Studio C++. Достоверность результатов работы подтверждена экспериментально.

Научные положения, выносимые на защиту.

1) Режим догруппировки сгустков электронов в пролетной трубе усиительного каскада ГУК, обеспечивающий увеличение первой гармоники конвекционного тока на первой зоне π -вида колебаний в 1.4 раза и 0-вида в 1.2 раза, достигается увеличением угла пролета между зазорами резонатора генераторной секции по сравнению с углом пролета для центров зон генерации с 7.8 рад до 8.2 рад для первой зоны π -вида колебаний и с 11 рад до 12 рад для 0-вида при сохранении амплитудных и фазовых условий самовозбуждения.

2) В самосогласованном режиме установление итерационного вычислительного процесса нарастания амплитуды колебаний на зазорах резонаторов ГУК достигается введением параметра нижней релаксации по напряжению, оптимальные значения которого при минимальном числе итераций зависят от нормированного эквивалентного сопротивления резонаторов R_z^H и при $R_z^H=2...3.4$ для π -вида колебаний и $R_z^H=3.6...5.1$ для 0-вида с погрешностью менее 0.1% аппроксимируются соотношением $\omega_{Honn}=b - 0.5R_z^H$, где для π -вида $b=1.9$ и для 0-вида $b=2.7$, соответственно для меньших значений R_z^H значение $\omega_{Honn}=1$ ($R_z^H=R_z/R_0$, $R_0=U_0/I_0$ – сопротивление луча).

3) Использование длинных зазоров в генераторной секции, работающей на первой зоне π -вида колебаний, с нормированным углом пролета 4.8 рад в первом зазоре и 4 рад во втором позволяет увеличить электронный КПД двухрезонаторного ГУК до 70% за счет дополнительного группирования электронов в таких зазорах и создания режима непрерывно слетающегося сгустка с минимальным разбросом скоростей.

Высокая степень достоверности научных результатов подтверждается корректным использованием фундаментальных законов и уравнений при выводе аналитических соотношений, совпадением результатов математического моделирования с аналитическими расчетами в области их адекватности, соответствием расчетных и экспериментальных параметров ГУК.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертации результаты были использованы в АО «НПП «Алмаз» г. Саратов при разработке опытного образца автогенератора на двухзазорном щелевом резонаторе с π -видом колебаний, а также используются в учебном процессе РГРТУ при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Расчет и проектирование микроволновых приборов и систем» и «Вакуумная и плазменная электроника».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: 20-й (2010 г.), 21-й (2011 г.), 23-й (2013 г.) Международных Крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» г. Севастополь; 9-й (2010 г.), 10-й (2012 г.) и 11-й (2014 г.) Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы электронного приборостроения» г. Саратов; IV (2013 г.) Международной научно-исследовательской и практической конференции «European Science and Technology» Munich, Germany; 1-й (2012 г.) Всероссийской конференции «Микроэлектроника СВЧ» г. Санкт-Петербург; 15-й (2010 г.) Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» г. Рязань; 2-й (2009 г.) Всероссийской научно-практической конференции «Приоритетные направления современной Российской науки глазами молодых ученых» г. Рязань.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 25 печатных работ, из которых 6 статей в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, и 8 работ, индексируемых в базе данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, приложений. Диссертация изложена на 195 страницах машинописного текста, включает в себя 96 рисунков, 11 таблиц. Список литературы состоит из 111 наименований цитируемых источников, из которых 9 – публикации автора диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении указываются цель и задачи, обоснована актуальность и научная новизна диссертационной работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе в историческом аспекте рассматривается развитие исследований по автогенераторам клистронного прямопролетного типа на резонаторах с одним зазором (монотрон) или несколькими зазорами. Впервые в истории 18-лучевой монотрон с одним широким зазором на импульсную мощность 104 кВт с КПД 12.5% был создан в 2010 г. в результате совместных усилий сотрудников РГРТУ (руководитель В.П. Панов) и АО «НПП «Исток» им. Шокина».

Численное моделирование усилительных клистронов проводится, в основном, в режиме заданных напряжений на зазорах резонаторов. Моделированию в самосогласованном режиме, что более актуально для автогенераторов, посвящена всего одна статья Д.М. Петрова с соавторами – 1975 г.

Известным недостатком всех автогенераторов на одном резонаторе является влияние нагрузки на их работу. В ГУК генераторная часть отделена от нагрузки усилительным каскадом, что исключает влияние нагрузки на работу генераторной секции и увеличивает КПД. Проведенный анализ показал перспективность использования резонаторов с одним или несколькими зазорами для создания автогенераторов клистронного типа в том числе для терагерцового диапазона. Наиболее простым по конструкции ГУК является двухрезонаторный прибор с генераторной секцией на двухзазорном резонаторе. Однако опубликованных сведений о работах по исследованию и оптимизации таких ГУК нет, что подтверждает *актуальность темы* данной диссертации.

Вторая глава посвящена разработке методики, численно-аналитической модели, алгоритма и программы оперативного анализа электронных процессов в ГУК. Схематическое изображение двухрезонаторного ГУК приведено на рис.1 (вакуумная оболочка не показана). Сплошной электронный поток, формируемый электронной пушкой *I*, поступает в генераторную секцию *II*, состоящую из резонатора с двумя зазорами 1 и 3, разделенными пролетной трубой 2. В режиме генерации в первом зазоре 1 происходит скоростная модуляция электронного потока, за счет этого в пролетной трубе 2 электронный поток предварительно группируется. Образующиеся сгустки при выполнении фазового условия самовозбуждения отдают часть своей энергии полю зазора 3. Электронный поток на выходе из генераторной секции будет иметь произвольный, в общем случае, скоростной разброс.

Двухзазорные резонаторы используются в усилительных клистронах в режимах скоростной модуляции и отбора энергии, в режиме самовозбуждения в центре зоны в генераторах. В диссертации предложен и исследуется измененный режим работы двухзазорного резонатора при совмещении функций генерации колебаний и скоростной модуляции электронов в фазе, обеспечивающей дальнейшую догруппировку электронных сгустков. При этом КПД увеличится по сравнению с КПД генератора без дополнительной секции, и генераторная секция будет полностью развязана от нагрузки.

Вначале для наглядного представления вычислительного процесса установления или затухания колебаний в автогенераторе в самосогласованном режиме с использованием кинематической теории группирования электронов выведены рекуррентные соотношения, связывающие амплитуды напряжений на *j* и

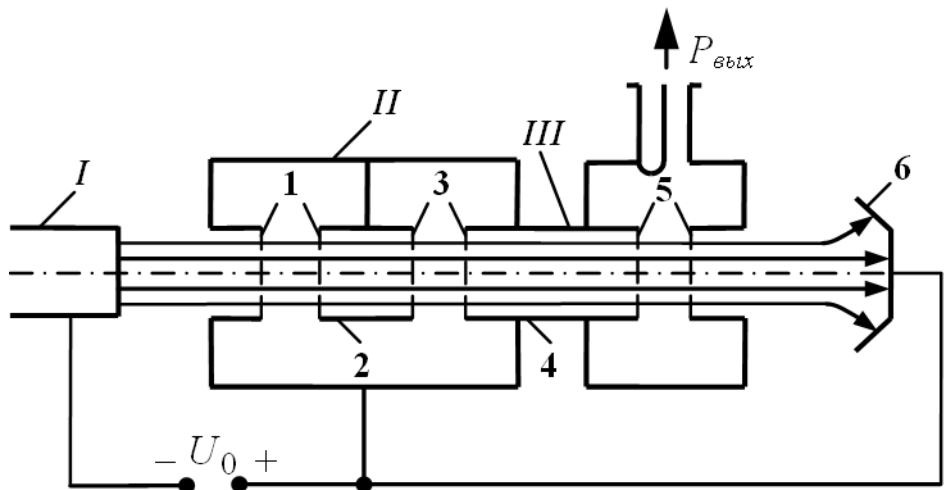


Рис. 1 – Схема двухрезонаторного ГУК

$j-1$ приближении: для 0-вида –

$$\frac{U_{m2}^{(j)}}{U_0} = \frac{1}{G_n^H} \left[\frac{G_{e1}}{G_0} \frac{U_{m1}^{(j-1)}}{U_0} + 2M_2 J_1 \left(\frac{1}{2} \frac{U_{m1}^{(j-1)}}{U_0} M_1 \theta_u \right) \right] - \frac{U_{m1}^{(j-1)}}{U_0}, \quad U_{m1}^{(j)} = K_{oc} U_{m2}^{(j)}, \quad (1)$$

для π -вида –

$$\frac{U_{m2}^{(j)}}{U_0} = \frac{1}{G_n^H} \left[\frac{G_{e1}}{G_0} \frac{U_{m1}^{(j-1)}}{U_0} + 2M_2 J_1 \left(\frac{1}{2} \frac{U_{m1}^{(j-1)}}{U_0} M_1 \theta_u \right) \right], \quad U_{m1}^{(j)} = U_{m2}^{(j)}, \quad (2)$$

а также получены уравнения для пускового тока и минимального первеанса, начиная с которых возможно самовозбуждение автогенератора на двухзазорном резонаторе. В соотношениях (1) – (2): M_1 и M_2 – коэффициенты взаимодействия для первого и второго зазоров, θ_u – угол пролета между центрами зазоров, K_{oc} – коэффициент обратной связи, G_{e1} – активная электронная проводимость первого зазора, $G_n^H = G_n/G_0$ – нормированная нагруженная проводимость. На рис. 2 показан переходной процесс установления при $G_n^H=1$ и затухания при $G_n^H=1.3$ колебаний в резонаторе π -вида с параметрами $\theta_u=5\pi/2$, $\theta_{d1}=4\pi/3$, $\theta_{d2}=\pi/2$, который наглядно демонстрирует возможность срыва колебаний в автогенераторе, непосредственно связанном с нагрузкой, что еще раз подтверждает актуальность темы диссертации.

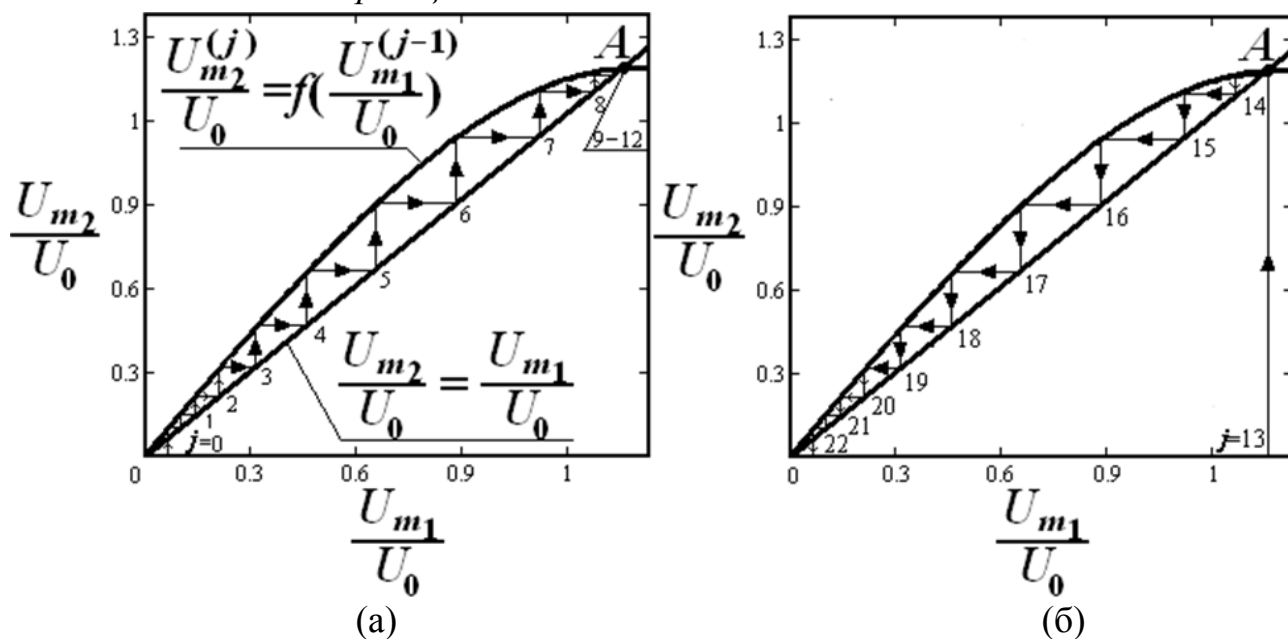


Рис. 2 – Процесс установления (а) и затухания (б) колебаний

Далее в диссертации приводятся алгоритм, структурная схема и вычислительные процедуры программы, моделирующей процесс установления колебаний в ГУК в самосогласованном режиме с использованием разрабатываемой численно-аналитической модели. Последовательность расчетов следующая. Вводятся исходные данные о параметрах луча (I_0 , U_0), параметрах электродинамической системы, числе резонаторов, всех продольных размерах, частотах и расстройках резонаторов усилительного блока. На нулевом приближении задаются нормированные значения амплитуд и фаз напряжений на всех зазорах.

Сначала рассчитываются электронные процессы в генераторном блоке. Решаются уравнения движения крупных частиц, которые именуются «электронами», до момента заполнения ими всей области взаимодействия двухззорного резонатора. После этого в течение одного периода продолжается решение уравнений движения. При движении электронов в зазорах с использованием алгоритма «шаг за шагом», теоремы Шокли-Рамо и численного Фурье-анализа рассчитываются активная и реактивная составляющие первой гармоники наведенного тока по соотношениям:

$$I_{нав}^A = \frac{4\pi}{NM} \left\{ \frac{1}{\theta_{d1}} \sum_{m=1}^M \left[\sum_k V_{m1,k}^{(j)}(\theta_m) \right] \cos \theta_m + \frac{1}{\theta_{d2}} \sum_{m=1}^M \left[\sum_k V_{m2,k}^{(j)}(\theta_m) \right] \cos \theta_m \right\}, \quad (3)$$

$$I_{нав}^P = \frac{4\pi}{NM} \left\{ \frac{1}{\theta_{d1}} \sum_{m=1}^M \left[\sum_k V_{m1,k}^{(j)}(\theta_m) \right] \sin \theta_m + \frac{1}{\theta_{d2}} \sum_{m=1}^M \left[\sum_k V_{m2,k}^{(j)}(\theta_m) \right] \sin \theta_m \right\}. \quad (4)$$

В соотношениях (3) – (4): $\theta_m = m\Delta\theta$ – текущая фаза электрона на шаге m , $\Delta\theta = 2\pi/M$ – шаг дискретизации решения уравнения движения, M – число разбиений периода по времени (фазам), N – число частиц на периоде. При каждом θ_m суммирование по k ведется для электронов, находящихся в первом и втором зазорах соответственно. Если в момент θ_m в первом или (и) во втором зазорах электроны отсутствуют, то соответствующие слагаемые в соотношениях (3) – (4) соответственно не учитываются. Первая гармоника наведенного тока на j приближении будет – $I_{нав}^{(j)} = \sqrt{(I_{нав}^A)^2 + (I_{нав}^P)^2}$, начальная фаза первой гармоники наведенного тока – $\varphi_I^{(j)} = \arctg \frac{I_{нав}^A}{I_{нав}^P}$, фазовый сдвиг между первой гармоникой

наведенного тока и напряжением – $\varphi_{I \wedge U}^{(j)} = \varphi_U^{(j)} - \varphi_I^{(j)} + \pi$. Затем на $j+1$ шаге определяются начальная фаза и амплитуда напряжения $\varphi_U^{(j+1)} = \varphi_U^{(j)} + (\psi - \varphi_{I \wedge U}^{(j)})$ и $\xi^{(j+1)} = I_{нав}^{(j)} R_{\vartheta}^n \cos \varphi_{I \wedge U}^{(j)}$, где ψ – фазовый угол расстройки контура, для генераторной секции $\psi=0$. После выполнения условий установления амплитуд и фаз напряжений на зазорах генераторной секции рассчитываются процессы группирования в пролетной трубе между резонаторами и отбора энергии в зазорах выходного резонатора, определяется электронный КПД. Исходными данными для расчета усилительного каскада являются фазы и скорости электронов на выходе из второго зазора генератора. При расчете процессов в зазорах используются известные решения уравнения движения для плоского зазора в кинематическом приближении, описывающие прямые, колебательные и возвратные движения электронов. При расчете фазовых траекторий в пролетных трубах с учетом пространственного заряда впервые использован нелинейный коэффициент редукции плазменной частоты, зависящий от коэффициента скоростной модуляции и фазы электронов в сгустке.

Программа, использующая данную методику, позволяет, в частном случае, рассчитывать процессы в ГУК в режиме заданных напряжений. При этом вместо алгоритма «шаг за шагом» при определении фаз и скоростей электронов

на выходе из зазоров целесообразно применять более оперативные методы решения трансцендентных уравнений. В диссертации исследованы методы дихотомии, хорд, простых итераций и Ньютона. Для расчетов выбран модифицированный метод Ньютона. В конце главы приводятся данные о разработанной программе «RAFT» для оперативного анализа ГУК. Описанная методика расчета ГУК в самосогласованном режиме реализована также в ранее разработанной на кафедре «Электронные приборы» (ЭП) доцентом В.И. Юркиным программе анализа «МЕР-GR», основанной на двумерной многослойной модели электронного потока из деформируемых элементов.

Третья глава посвящена исследованию процессов установления колебаний в генераторной секции в самосогласованном режиме и определению условий, при которых возможна догруппировка электронов после выхода из генераторной секции. Предварительно было проведено тестирование программы оперативного анализа «RAFT» путем сравнения распределения скоростей электронов на выходе из второго зазора генератора, полученных по программе и по аналитическим соотношениям, выведенным в диссертационной работе. Расхождение результатов не превысило 3%.

Далее было проведено исследование электронной проводимости G_e в СВЧ зазорах с углом пролета менее π (рис. 3). Численным моделированием и с использованием полученных аналитических соотношений было установлено, что в отличие от имеющихся представлений при угле пролета $\theta_d \rightarrow 0$ и увеличении нормированной амплитуды переменного напряжения $\xi = U_m/U_0$ от 1 до 1.4, G_e увеличивается от 0 до $0.32G_0$ (рис.3, а), а затем уменьшается до 0 при $\xi \rightarrow \infty$. Причиной немонотонной зависимости G_e от θ_d при $U_m > U_0$ является появление в зазоре колеблющихся и отраженных электронов. В диссертации рассмотрены физические процессы, сопровождающие эти явления.

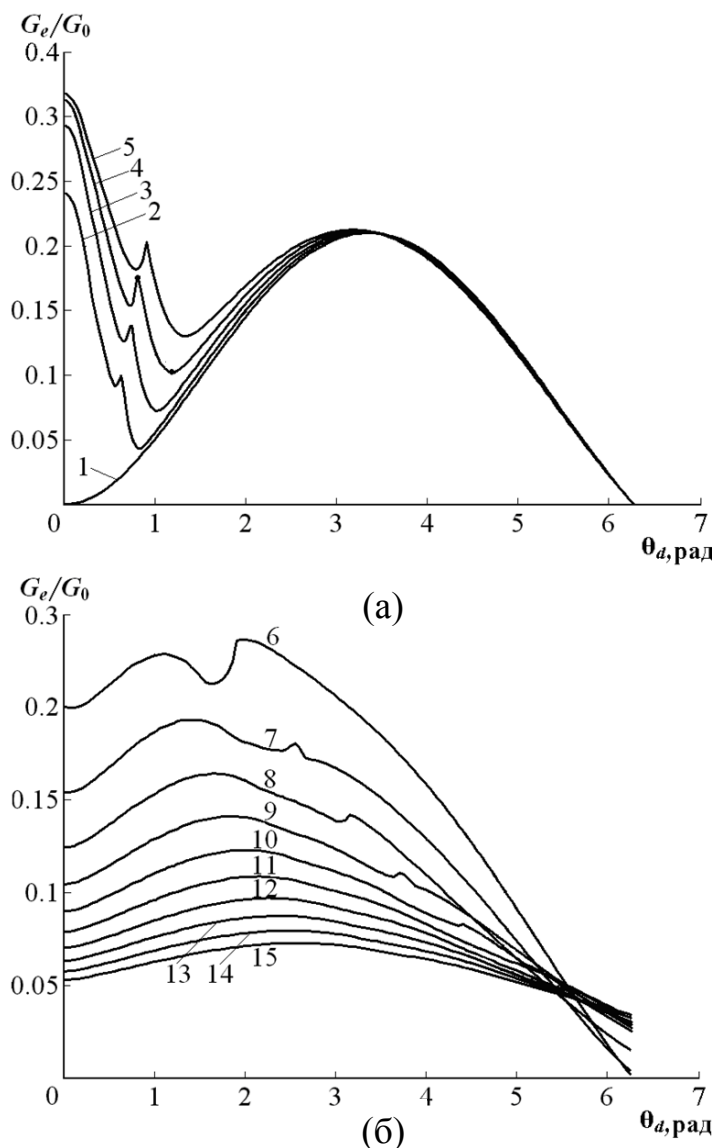


Рис. 3 – Зависимость электронной проводимости G_e/G_0 от угла пролета θ_d :

(а) – кривые 1 – 5 соответствуют $\xi=1,1.1,1.2,1.3,1.4$; (б) – кривые 6 – 15 соответствуют $\xi=3,4,5,6,7,8,9,10,11,12$

Для определения режимов догруппировки электронов после генераторной секции используется гармонический анализ импульсов тока (рис. 4, б) и распределения скоростей (рис. 4, в). Для эффективного уплотнения сгустков максимум импульса конвекционного тока на выходе второго зазора генераторной секции (рис. 4, а) должен совпадать с переходом в распределении скоростей от замедленных электронов к ускоренным. В качестве меры выполнения этого условия использована величина $\Delta\varphi = \varphi_V - \varphi_I$, где φ_V и φ_I – начальные фазы первых гармоник распределения скоростей электронов и тока.

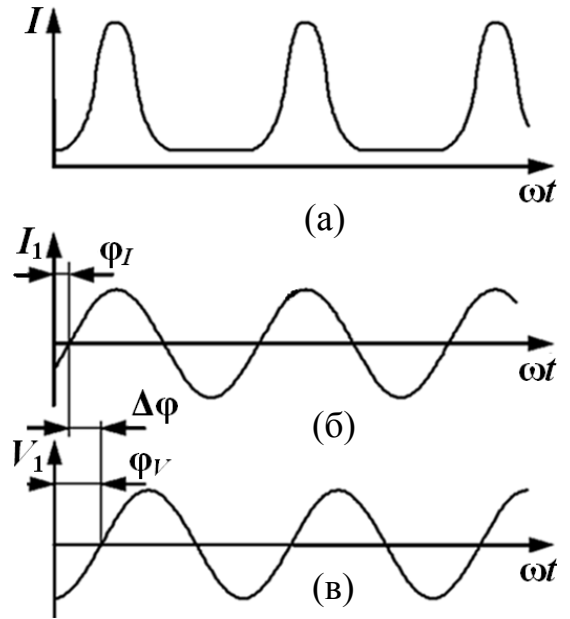


Рис. 4 – Фазовое условие догруппировки

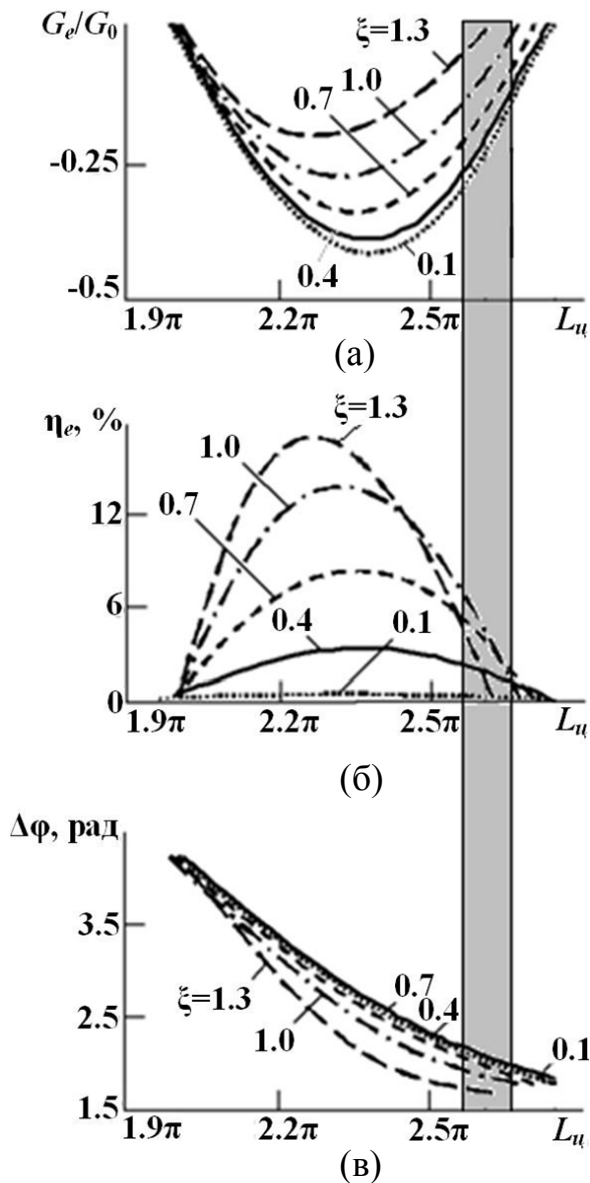


Рис. 5 – К определению условий догруппировки

Для наиболее эффективного группирования $\Delta\varphi$ должно стремиться к $\pi/2$. На рис. 5 для π -вида колебаний приведены зависимости электронной проводимости G_e/G_0 (рис. 5, а), электронного КПД η_e (рис. 5, б) и фазового сдвига $\Delta\varphi$ (рис. 5, в) от угла пролета между центрами зазоров L_q . На рис. 5 выделена область, в которой реализуются условия автогенерации ($G_e < 0$, $\eta_e = 2...5\%$) и догруппировки электронов ($\Delta\varphi \rightarrow \pi/2$). При этом расстояние L_q между серединами зазоров должно быть увеличено по сравнению с его значением для центра зоны генерации в 1.1...1.2 раза с 2.3π до $(2.6...2.75)\pi$. Приведенные на рис. 6 зависимости, рассчитанные для $L_q = 2.65\pi$, подтверждают, что при всех ξ после генераторной секции происходит рост амплитуды первой гармоники конвекционного тока, т.е. дополнительное группирование электронов.

Подобные исследования были проведены и для первой зоны 0-вида колебаний. Рис. 7 иллюстрирует как изменение расстояния L_q для резонатора с углами пролета в зазорах $\pi/2$ и напряжения на

них $\xi_1 = \xi_2 = 0.33$ влияет на процесс группирования электронов за вторым зазором. При расстояниях $L_{\text{ц}} = (3.0 \dots 3.3)\pi$ за зазором происходит спад первой гармоники тока. Значительная догруппировка до значений $I_1 = (1.35 \dots 1.4)I_0$ наблюдается при рекомендованных значениях $L_{\text{ц}} = (3.7 \dots 3.9)\pi$. Следовательно, для синфазного вида колебаний, как и для противофазного, для обеспечения режима эффективной догруппировки требуется увеличение расстояния $L_{\text{ц}}$ в 1.1...1.2 раза по сравнению с расстоянием для центра зоны генерации. Эти результаты полностью соответствуют полученным научно-обоснованным рекомендациям по выбору $L_{\text{ц}}$.

Четвертая глава посвящена, в основном, оптимизации параметров генераторной и усилительной части трех образцов ГУК с электронным КПД в качестве функции цели. Для устранения расхождения и ускорения итерационного вычислительного процесса установления колебаний на зазорах в самосогласованном режиме введен коэффициент нижней релаксации по напряжению. Получены зависимости оптимального значения этого коэффициента от нормированного эквивалентного сопротивления резонатора, которые с погрешностью менее 0.1% аппроксимиро-

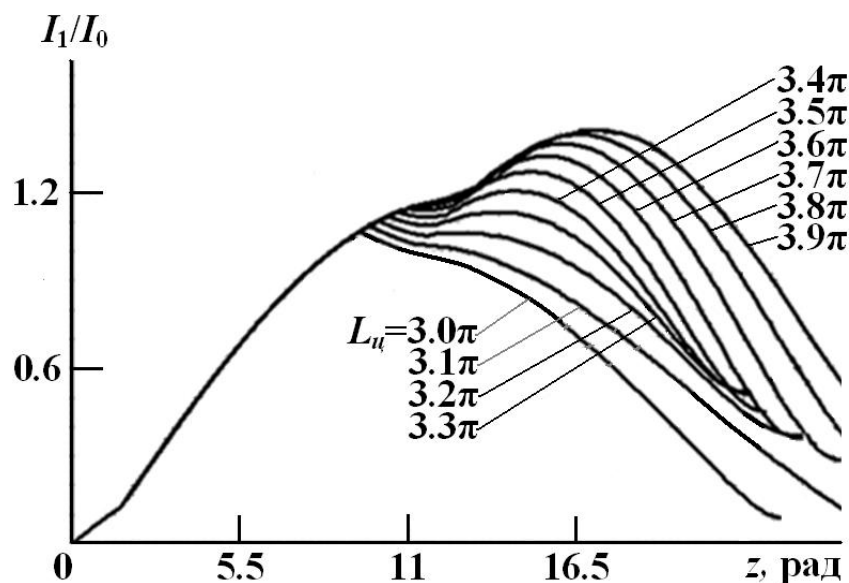


Рис. 7 – Кривые изменения амплитуды первой гармоники конвекционного тока вдоль прибора на 0-виде колебаний

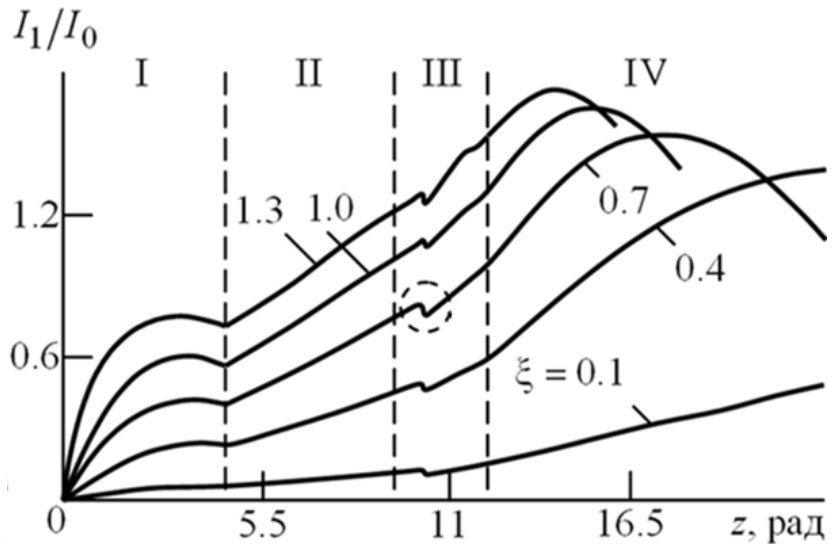


Рис. 6 – Кривые изменения амплитуды первой гармоники конвекционного тока вдоль прибора на π -виде колебаний (I, III – области зазоров, II, IV – пространство группирования)

ваны уравнениями прямых. Для визуализации электронных процессов в ГУК разработана программа «GRAF», которая включена в разработанную в диссертации программу «RAFT» и ранее разработанные на кафедре ЭП РГРТУ доцентом В.И. Юркиным программы «MEP-GR», «MED(SCM)», основанные на многослойной модели электронного потока из деформирующихся элемен-

тов и методе конечных разностей при расчете всех внешних статических и переменных полей и поля пространственного заряда в системе электродов произвольной формы.

Были проведены исследования по повышению КПД семилучевого трехрезонаторного ГУК С-диапазона с генераторной секцией на двухззорном резонаторе, взятого в качестве аналога. Расчеты показали, что генераторная секция возбуждается в центре первой зоны π -вида колебаний. На рис. 8 приведены фазовые траектории и распределение первой гармоники конвекционного тока вдоль прибора. Так как первый резонатор стабилизирован высокочастотным резонатором и внешняя нагрузка отсутствует, то эквивалентное сопротивление генераторной секции велико и на ее зазорах в исходном варианте устанавливается напряжение с амплитудой $0.8U_0$. При такой амплитуде заметное группирование наблюдается уже в первом зазоре и амплитуда первой гармоники конвекционного тока на его выходе составляет $0.3I_0$ (рис. 8, б). В трубе, разделяющей зазоры, происходит интенсивная догруппировка сгустков (рис. 8, а) и в области второго зазора конвекционный ток достигает величины $1.2I_0$ (рис. 8, б). После генераторной секции первоначальный сгусток «разваливается» и первая гармоника тока падает до значения $0.35I_0$. Вокруг электронов разрежения начинает формироваться новое уплотнение и ток увеличивается до значения $0.84I_0$ на входе во второй резонатор. На зазорах второго резонатора устанавливаются напряжения с амплитудами $0.12U_0$, далее в целом электронный поток разгруппируется, а конвекционный ток уменьшится. На зазорах выходного резонатора устанавливаются напряжения с амплитудами $0.26U_0$. Электронный КПД составил 12%, КПД по мощности в нагрузку 10%, выходная мощность 4.9 Вт, что соответствует экспериментальным значениям. Изменением расстройки промежуточного резонатора лучших значений получить не удалось.

Затем была проведена параметрическая оптимизация, в результате которой был смоделирован режим непрерывно слетающегося сгустка (рис. 8, в) с непрерывным ростом конвекционного тока вдоль прибора (рис. 8, г). Были изменены размеры областей взаимодействия резонаторов. В первом резонаторе расстояние между серединами зазоров увеличено до 8.82 рад, т.е. в 1.2 раза, что соответствует краю первой зоны генерации и полученным в третьей главе рекомендациям. Размеры зазоров остались без изменения. Фаза скоростной модуляции была получена такой, что при этом в трубе дрейфа между первым и вторым резонаторами происходила догруппировка электронных сгустков. Размеры зазоров второго резонатора и его резонансная частота остались без изменения. В третьем резонаторе, настроенном на частоту генерируемых колебаний f_0 , длина зазоров уменьшена до 1.4 рад. Расстояние между центрами зазоров второго и третьего резонаторов сокращено, соответственно, до 3.08 рад и 2.24 рад. На зазорах резонаторов установились следующие амплитуды напряжения: в первом – $0.15U_0$, во втором – $0.2U_0$, в третьем – $0.65U_0$. Электронный КПД составил 49%, КПД по мощности в нагрузку – 41%, выходная мощность – 20 Вт.

Дополнительно были исследованы возможности двухрезонаторной конструкции. Выходной резонатор поставлен на место второго резонатора.

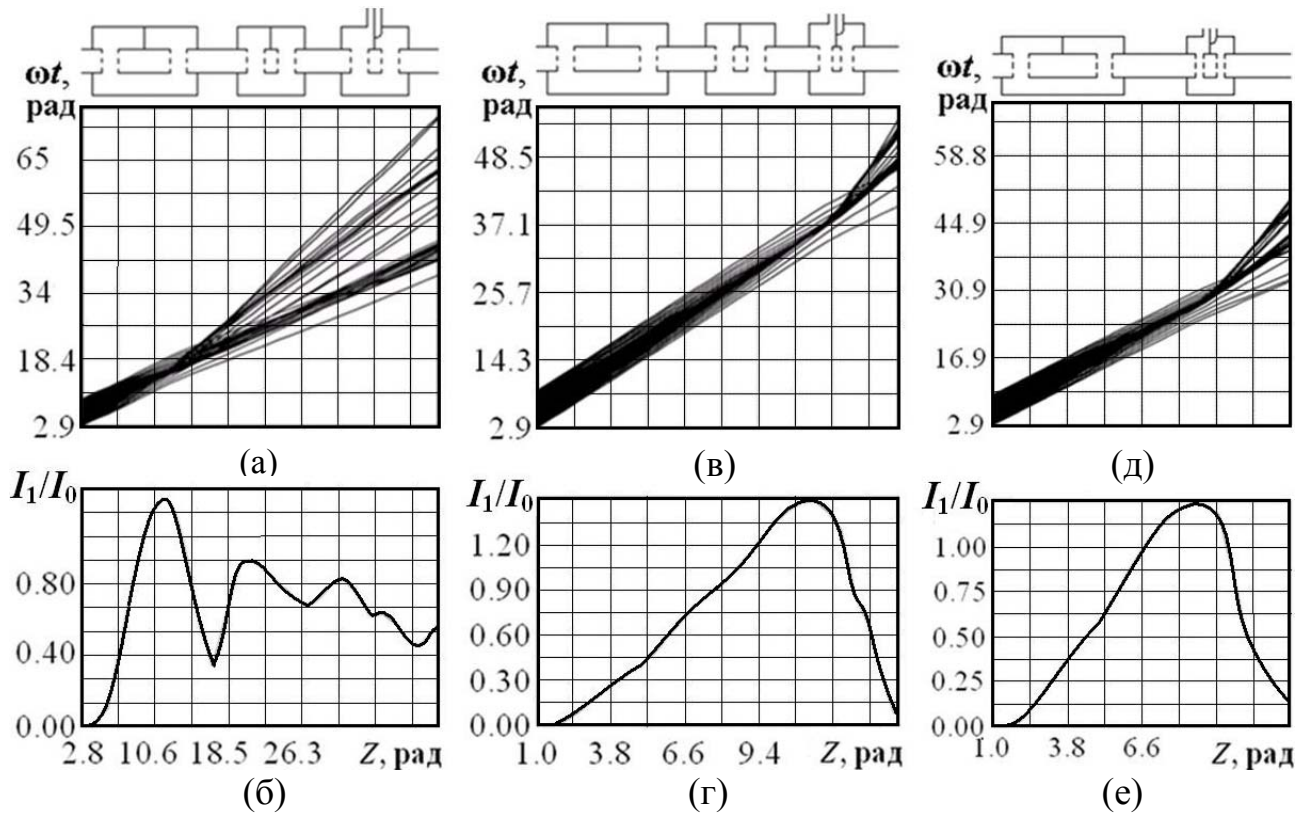


Рис. 8 – Фазовые траектории (а), (в), (д) и распределения первой гармоники конвекционного тока (б), (г), (е): в исходном варианте и в оптимизированных по КПД конструкциях

В результате параметрической оптимизации был смоделирован режим непрерывно слетающего сгустка (рис. 8, д) с непрерывным ростом конвекционного тока вдоль прибора (рис. 8, е). Амплитуды напряжений на зазорах резонатора генераторной секции и выходного резонатора составили $0.23U_0$ и $0.5U_0$. КПД по мощности в нагрузку 36%, выходная мощность 17 Вт уменьшились в 1.14 раза по сравнению с оптимизированной трехрезонаторной конструкцией. Вместе с тем размеры резонаторного блока сократились в 1.4 раза *при сохранении продольных размеров первых двух секций исходного варианта*.

В целом показано, что использование рекомендаций по увеличению расстояния между серединами зазоров генераторной секции в 1.2 раза по сравнению с их значениями для центра зоны генерации позволяет получить непрерывно слетающийся сгусток и увеличить КПД и выходную мощность по сравнению с исходным вариантом в 4 раза в оптимизированной трехрезонаторной конструкции и в 3.6 раза в двухрезонаторной.

Сопоставление результатов численного моделирования с результатами эксперимента было проведено для трехрезонаторного четырехлучевого клистрода с двухзазорными резонаторами, работающего на частоте 530 МГц. Клистрода был разработан в СГТУ, а изготовлен и испытан в ОАО «НПП «Контакт» г.Саратов. В клистронной части прибор состоит из двух двухзазорных резонаторов. При этом второй резонатор клистрода являлся генераторной секцией ГУК, а третий – выходным резонатором. Расчетный электронный КПД оптимизированного варианта составил 54%, КПД по мощности в нагрузку – 52%. В

эксперименте был получен КПД 54%. Сопоставление результатов свидетельствует о возможности практической реализации двухрезонаторных ГУК с КПД около 50%.

В заключение была проведена параметрическая оптимизация, как геометрических размеров, так и электродинамических параметров резонаторов, обеспечивающих максимально возможное значение КПД. За основу был взят многолучевой клистрон сантиметрового диапазона, на базе которого в РГРТУ был спроектирован, а в АО «НПП «Исток» им. Шокина» впервые был создан 100-киловаттный одноззорный монотрон с КПД 12.5%.

В оптимизированном варианте с генераторной секцией на двухззорном резонаторе π -вида колебаний и выходным одноззорным резонатором оказалась реализованной идея совмещения в двухззорном резонаторе функции генерирования колебаний и скоростной модуляции электронов в нужной фазе: при положительном значении электронного КПД генераторной секции 2% на всем протяжении прибора прослеживается слетающийся сгусток с почти неизменным центром группирования. Особенностью оптимизированного варианта является наличие в генераторной секции длинных зазоров с углами пролета 4.8 рад в первом и 4 рад во втором, что позволяет увеличить КПД двухрезонаторного ГУК до 70% за счет дополнительного группирования электронов в таких зазорах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты.

1. Разработана численно-аналитическая математическая модель, методика, алгоритм и программа оперативного анализа ГУК в режиме самосогласованного поля.
2. Показано, что введение в самосогласованном режиме коэффициента нижней релаксации по напряжению устраняет расхождение и ускоряет вычислительный процесс итерационного установления колебаний на зазорах резонатора.
3. Определены параметры области взаимодействия двухрезонаторного ГУК с генераторной секцией на двухззорном резонаторе в совмещенном режиме генерации и усиления, при которых на выходе из генераторной секции создается скоростная модуляция электронов в фазе, обеспечивающей догруппировку сгустков в пролетной трубе усилительного каскада, увеличивает первую гармонику конвекционного тока на первой зоне π -вида колебаний в 1.4 раза и 0-вида в 1.2 раза по сравнению с величиной $1.16I_0$ в пролетной трубе двухрезонаторного клистрона.
4. Показано, что при реализации режима догруппировки в ГУК на двухззорных резонаторах, взятого в качестве аналога, возможно увеличение КПД с 10% до 41% в трехрезонаторной конструкции и до 36% в двухрезонаторной при сохранении исходных продольных габаритных размеров резонаторных секций.

5. Получено аналитическое соотношение для зависимости электронной проводимости от амплитуды переменного напряжения на зазоре, в соответствии с которым электронная проводимость обращается в нуль при нулевом и бесконечном значении нормированной амплитуды и имеет максимум, равный $0.32G_0$ при амплитуде $U_m=1.41U_0$. Полученное соотношение может служить *новым тестом* при проверке в *нелинейных режимах* методик и программ, моделирующих электронные процессы в СВЧ зазорах.

6. С помощью разработанной численной модели установлено, что использование длинных зазоров в генераторной секции с нормированным углом пролета 4.8 рад в первом зазоре и 4 рад во втором, позволяет увеличить электронный КПД двухрезонаторного ГУК до 70%.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ

1. Акимова, Т.С. Графическая программа отображения информации при исследовании электронных процессов в приборах клистронного типа / Т.С. Акимова, В.И. Юркин, А.Ю. Митраков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2010. – № 1. – Вып. 31 – С. 101 – 104.

2. Федяев, В.К. Условия самовозбуждения питрона / В.К. Федяев, Т.С. Акимова, О.А. Горлин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2010. – № 33. – Вып. 33. – С. 64 – 68.

3. Федяев, В.К. Работа двухзазорного резонатора в генераторно-усилительном клистроне / В.К. Федяев, Т.С. Акимова // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2012. – Вып. 2. – С. 101 – 109.

4. Ремизова, Т.С. Методика расчета приборов клистронного типа на двухзазорных резонаторах в самосогласованном режиме // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – № 4-1. – Вып. 46. – С. 119 – 125.

5. Ремизова, Т.С. Оптимизация итерационного процесса моделирования автогенераторов на двухзазорных резонаторах / Т.С. Ремизова, В.К. Федяев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2013. – № 4-2. – Вып. 46. – С. 103 – 106.

6. Ремизова, Т.С. Расчет траектории электронов в пролетных трубах двухрезонаторного генераторно-усилительного клистрона с использованием нелинейного коэффициента редукции / Т.С. Ремизова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – № 2. – Вып. 48. – С. 107 – 110.

Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus

7. Акимова, Т.С. Автогенератор на двухзазорном резонаторе с буферным каскадом / Т.С. Акимова, В.К. Федяев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы Междунар. Крымской конф. / СевНТУ, Севастополь, Украина. – 2010. – Т. 1. – С. 269 – 270.

8. Акимова, Т.С. Автогенератор на двухзазорном резонаторе с буферно-усилительным каскадом / Т.С. Акимова, В.К. Федяев, В.И. Юркин // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ. Саратов. – 2010. – С. 109 – 113.

9. Акимова, Т.С. Особенности работы двухзазорного резонатора в генераторно-усилительном клистроне / Т.С. Акимова, В.К. Федяев // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы Междунар. Крымской конф. / СевНТУ, Севастополь, Украина. – 2011. – Т. 1. – С. 308 – 309.

10. Ремизова, Т.С. Электронная проводимость СВЧ-зазоров в режиме больших амплитуд напряжений / Т.С. Ремизова, В.К. Федяев // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ. Саратов. – 2012. – С. 64 – 65.

11. Ремизова, Т.С. Разработка методики расчетов приборов клистронного типа в самосогласованном режиме / Т.С. Ремизова, В.К. Федяев, В.И. Юркин // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ. Саратов. – 2012. – С. 91 – 93.

12. Ремизова, Т.С. Методика расчета приборов клистронного типа в самосогласованном режиме / Т.С. Ремизова, В.К. Федяев, В.И. Юркин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы Междунар. Крымской конф. / СевНТУ, Севастополь, Украина. – 2013. – С. 213 – 214.

13. Ремизова, Т.С. Коэффициент нижней релаксации при моделировании генераторно-усилительных клистронов в самосогласованном режиме / Т.С. Ремизова, В.К. Федяев // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ. Саратов. – 2014. – Т. 1. – С. 63–64.

14. Ремизова, Т.С. Расчет группирования электронов в генераторно-усилительных клистропах с использованием нелинейного коэффициента редукции поля пространственного заряда / Т.С. Ремизова, В.К. Федяев // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / СГТУ. Саратов. – 2014. – С. 65 – 66.

15. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615271.** Программа динамического экспресс-анализа приборов клистронного типа в самосогласованном режиме на основе одномерной модели электронного потока с учетом нелинейного коэффициента редукции // Ремизова Т.С.; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» (RU). – заявка № 2014612663; дата поступления 25.03.2014 г.; дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22.05.2014 г.

Прочие публикации

16. Remizova, T.S. Investigation of source of microwave oscillations of simple construction / T.S. Remizova, V.I. Yrkin // European Science and Technology. – 2013. Vol. I. – P. 327 – 333.

17. Remizova T. Investigation of Double-Gap Cavity Generating-Amplifying Klystrons / Tatyana Remizova, Valeriy Fedyaev, Basil Yurkin // International Journal of Energy and Power Engineering. – Vol. 2. – No. 3. – 2013. – P. 104 – 108.

18. Акимова, Т.С. Разработка графической программы и исследование процессов в генераторе СВЧ с рекуперацией энергии электронов / Т.С. Акимова, А.Ю. Митраков // материалы студ. науч.-техн. конф. / РГРТУ, Рязань. – 2008. – С. 3 – 5.

19. Акимова, Т.С. Информационное обеспечение процесса проектирования автогенератора СВЧ / Т.С. Акимова // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: материалы Всеросс. науч.-техн. конф./ РГРТУ, Рязань. – 2010. – С. 75 – 77.

20. Акимова, Т.С. Решение уравнений движения электронов в СВЧ зазоре методом Ньютона / Т.С. Акимова // Электроника: сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. – 2010. – С. 3 – 7.

21. Акимова, Т.С. Расчет моноотрона с рекуперацией энергии электронов / Т.С. Акимова, В.И. Юркин // Электроника: сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. – 2010. – С. 7 – 11.

22. Акимова, Т.С. Скоростная модуляция электронов в двухзазорном резонаторе в режиме генерации / Т.С. Акимова // Электроника: сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. – 2011. – С. 18 – 21.

23. Акимова, Т.С. Генераторно-усилительный клистрон на двухзазорных резонаторах / Т.С. Акимова, В.К. Федяев, В.И. Юркин // Микроэлектроника СВЧ: материалы трудов Всеросс. конф. / СПбГЭТУ, Санкт-Петербург. – 2012. – Т. 2. – С. 11 – 13.

24. Ремизова, Т.С. Использование парциального параметра группирования в пролетном клистроне / Т.С. Ремизова // Электроника: сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. – 2013. – С. 3 – 5.

25. Ремизова, Т.С. Расчет электронной проводимости СВЧ зазоров в режиме больших амплитуд / Т.С. Ремизова, О.А. Семизарова // Электроника: сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. – 2013. – С. 59 – 63.

26. Ремизова, Т.С. Определение длин пролетных труб в клистроне с учетом коэффициента редукции поля пространственного заряда / Т.С. Ремизова // Электроника: сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ. – 2013. – С. 74 – 75.

Ремизова Татьяна Сергеевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ КЛИСТРОНОВ
С ГЕНЕРАТОРНОЙ СЕКЦИЕЙ НА ДВУХАЗОРНОМ РЕЗОНАТОРЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать 30.06.2015 г. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.