

На правах рукописи

ПАШКОВ Андрей Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОЛЯМИ
РЕЗОНАТОРОВ ГИБРИДНЫХ И ГЕНЕРАТОРНЫХ
ПРИБОРОВ КЛИСТРОННОГО ТИПА**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань – 2007

Работа выполнена в ГОУВПО “Рязанский государственный радиотехнический университет”

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Федяев Валерий Кузьмич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Петров Дмитрий Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Юдаев Юрий Алексеевич

Ведущая организация: **ФГУП “НПП “Торий”, г. Москва**

Защита состоится “ 27 ” февраля 2007 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д212.211.03 в ГОУВПО “Рязанский государственный радиотехнический университет” по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУВПО “Рязанский государственный радиотехнический университет”.

Автореферат разослан “ ” января 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.211.03
д-р техн. наук, профессор

Б.И. Колотилин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие многих отраслей техники связано с совершенствованием параметров и конструкций электронных приборов сверхвысоких частот. Совершенствование существующих и разработка новых приборов СВЧ с улучшенными массогабаритными и эксплуатационными параметрами всегда было и остается актуальной проблемой электроники СВЧ. Одними из самых многочисленных и распространенных приборов СВЧ О-типа являются приборы клистронного типа.

К приборам **клистронного типа** можно отнести приборы СВЧ О-типа с прямолинейными потоками, в которых формируются сгустки электронов и преобразование энергии сгустков в энергию выходного сигнала происходит в резонаторе. Разновидности таких приборов будут отличаться способом формирования сгустков. Таким образом, к приборам клистронного типа наряду с классическими пролетными и отражательными клистрономы можно отнести гибридные приборы: лампы Гаева, тристрон, клистрод, ИОТ, светрод, истрод и генераторные приборы: монотрон, диотрон, генератор на двухзазорном резонаторе.

За рубежом гибридные двухрезонаторные приборы, прототипом которых является лампа Гаева, под названием клистрод и ИОТ выпускаются в США и Англии для передатчиков телевизионных станций. Они признаны наиболее перспективными для цифрового телевидения. В России опытные образцы гибридных приборов в отечественном многолучевом исполнении под названием светрод изготовлены в ФГУП «НПП «Светлана» В.В. Яковенко и под названием истрод созданы в ФГУП «НПП «Исток» М.И. Лопиным. Первые образцы гибридных приборов с промежуточным резонатором и догруппировкой исходных сгустков - тристроны были изготовлены, теоретически и экспериментально обследованы в 60-х годах прошлого века в ЛЭТИ (теперь СПб ГЭТУ) А.Д. Сушковым и В.К. Федяевым. Первый экспериментальный образец многолучевого телевизионного тристрона был изготовлен в ФГУП «НПП «Контакт» В.А. Царевым.

Физические процессы в гибридных приборах клистронного типа значительно сложнее, чем в обычных клистрономы. Возможно поэтому исследования физических процессов, определяющих принцип работы гибридных приборов путем математического моделирования, находятся на начальном этапе.

В настоящее время появился повышенный интерес к автогенераторам СВЧ простейшей конструкции. Примером может служить серия публикаций Дж. Баррозо по расчету монотронов. Альтернативой монотрономы могут быть автогенераторы на резонаторах с двойным зазором. Возможность практической реализации таких автогенераторов была показана в 1963 г. В.П. Пановым и А.Н. Балябиным, на резонаторе с ленточным лучом был получен КПД 2%. В последнее время публикаций по исследованию процессов в автогенераторах на резонаторах с двойным зазором нет. Действующих современных образцов автогенераторов на одиночных или двойных зазорах тоже нет.

Особенностью гибридных и генераторных приборов является то, что они работают в существенно нелинейных режимах, когда амплитуды переменных токов и напряжений сравнимы или больше их постоянных составляющих. Поэтому выходные параметры таких приборов определяются **нелинейными процессами** взаимодействия электронов с полями резонаторов. Исследование этих процессов для определения параметров области взаимодействия резонансных систем, обеспечивающих максимальные значения КПД новых гибридных и генераторных приборов клистронного типа, является **актуальной задачей**.

Целью диссертационной работы является исследование нелинейных процессов взаимодействия электронов с полями резонаторов гибридных и генераторных приборов клистронного типа для выявления параметров области взаимодействия резонансных систем, обеспечивающих режимы с максимальным КПД, и использование полученных результатов для проектирования гибридных приборов клистронного типа.

Достижение этой цели требует решения **нескольких взаимосвязанных задач**, основными из которых являются:

- анализ известных конструкций приборов клистронного типа, существующих методов расчета процессов взаимодействия электронов с полями резонаторов;

- создание единой для всех гибридных и генераторных приборов клистронного типа численно-аналитической математической модели взаимодействия электронов с полями резонаторов и программного обеспечения для оперативного расчета этих приборов в линейных и нелинейных режимах;

- исследование с использованием разработанной модели нелинейных процессов взаимодействия электронов с полями резонаторов в ряде новых перспективных приборах (клистродах и тристродах с одно- и двухзазорными резонаторами, автогенераторах простой конструкции на одном резонаторе с одним и двумя зазорами взаимодействия);

- выработка на основе этих исследований рекомендаций по выбору параметров и режимов работы области взаимодействия резонансных систем, обеспечивающих максимальные значения КПД в гибридных приборах клистронного типа и автогенераторах простой конструкции.

Научная новизна выполненных исследований заключается в том, что впервые:

- 1) для гибридных и генераторных приборов клистронного типа разработана численно-аналитическая математическая модель процессов взаимодействия электронов с полями СВЧ зазоров. Сочетание численных и аналитических методов позволило создать быстродействующую программу экспресс-анализа, которая в отличие от программ, основанных на полностью численных методах, позволяет оперативно анализировать процессы взаимодействия электронов с полями СВЧ зазоров;

- 2) оптимизированы по КПД режимы и размеры области взаимодействия выходных одно- и двухзазорных резонаторов клистродах и тристродах при раз-

ных углах отсечки катодного тока. Получены следующие предельные значения электронного КПД при рекомендованном угле отсечки 90^0 :

- 82% для клистрода с одноззорным резонатором;
- 86% для клистрода с двухззорным резонатором на π -виде колебаний;
- 89% для тристрода с одноззорным резонатором;
- 92% для тристрода с двухззорным резонатором на π -виде колебаний;

3) определены максимальные значения электронного КПД автогенераторов на резонаторе с двумя зазорами взаимодействия:

- для резонатора с идентичными зазорами максимальное значение электронного КПД на π -виде колебаний соответствует второй зоне генерации и составляет 28%, для нулевого вида - первой зоне и составляет 29%;
- для резонатора с зазорами разной длины максимальное значение электронного КПД на π -виде колебаний составляет 51%.

С использованием численно-аналитической математической модели электронных процессов взаимодействия в СВЧ зазорах получены **частично новые научные результаты**. Установлено, что:

1) СВЧ зазор в режиме большого сигнала может быть эффективным группирователем электронов, конвекционный ток внутри зазора конечной длины при универсальном параметре нелинейности $\delta > 0,5$ может быть больше, чем в пространстве группирования при синусоидальной скоростной модуляции бесконечно узким зазором и достигает значения $1,48I_0$ при $\delta = 1$;

2) активная и реактивная составляющие электронной проводимости в нелинейном режиме существенно зависят от параметра δ , электронная проводимость в областях отрицательных значений, где возможна автогенерация, уменьшается по абсолютной величине с ростом δ от малосигнальных значений до 0, а затем становится положительной;

3) электронный КПД в зонах автогенерации монострода зависит от δ , имеются оптимальные значения δ , при которых КПД максимален и составляет 18% при $\delta = 0,5$ в первой зоне и 14% при $\delta = 0,3$ во второй зоне генерации.

Научно-практическая ценность результатов работы.

1. Разработаны рекомендации по выбору параметров области взаимодействия резонансных систем для обеспечения максимальных по КПД режимов работы гибридных приборов. Установлено, что при угле отсечки 90^0 :

- в клистроде с одноззорным выходным резонатором для получения максимального электронного КПД 82% приведенная длина зазора должна составлять $D = \pi/4$ при нормированной амплитуде напряжения $\xi = 1,2$;

- в клистроде с двухззорным выходным резонатором на π -виде колебаний для получения максимального электронного КПД 86% приведенные длины зазоров должны составлять $D_1 = D_2 = \pi/4$ при $\xi_1 = \xi_2 = 0,6$ и нормированном расстоянии между центрами зазоров $L_u = 2 \text{ рад}$;

- в тристроде с одноззорным выходным резонатором для получения максимального электронного КПД 89% приведенная длина зазора должна со-

ставлять $D = \pi/4$ при нормированной амплитуде напряжения $\xi = 1,25$;

- для тристрона с двухзазорным резонатором на π -виде колебаний для получения максимального электронного КПД 92% приведенные длины зазоров должны составлять $D_1 = D_2 = \pi/4$ при $\xi_1 = \xi_2 = 0,7$ и нормированном расстоянии между центрами зазоров $L_y = 1,76 \text{ рад}$.

2. Проведено проектирование области взаимодействия многолучевого телевизионного тристрона на выходную мощность 12 кВт , с использованием полученных результатов в ФГУП “НПП “Контакт” изготовлен опытный образец телевизионного тристрона.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы: 1) использованы в ФГУП “НПП “Контакт” и СГТУ (г. Саратов) при разработке многолучевого телевизионного тристрона; 2) используются в ФГУП “НПП “Исток” при разработке автогенераторов на одиночном и двойном зазоре; 3) используются в учебном процессе РГРТУ: в лекционном курсе, лабораторных работах и курсовой работе по магистерской программе “Приборы с комбинированным управлением током”.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: фундаментальностью исходных уравнений и законов, используемых для построения математических моделей; соответствием результатов расчета по разработанной модели и результатов, полученных по другим более сложным математическим моделям; совпадением результатов расчета с результатами тестовых задач, имеющих известное аналитическое решение; совпадением результатов по монотрону с результатами других авторов, полученными разными методами в разных странах.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Использование универсального параметра нелинейности плоских СВЧ зазоров, условий эквивалентности сеточных и бессеточных зазоров и функции формы тока произвольного вида позволяет проводить по единой методике, основанной на численно-аналитической математической модели, исследование нелинейных процессов взаимодействия электронов с полями СВЧ зазоров гибридных и генераторных приборов клистронного типа и получить результаты, пригодные (с погрешностью менее 5% при микропервансах потока менее 0,5) для различного сочетания геометрических размеров и режимов работы зазоров резонаторов.

2. Для получения максимального электронного КПД в гибридных приборах клистронного типа с двухзазорными резонаторами в нелинейном режиме по сравнению с линейным следует существенно сокращать расстояние между серединами зазоров: в 1,6 раза (с 3,14 до 2 *рад*) в клистроне и в 1,8 раза (с 3,14 до 1,76 *рад*) в тристроне.

3. В однозазорном монотроне с однородным полем при величине конвекционного тока большей, чем в двухрезонаторном клистроне, фазовый сдвиг между максимумами конвекционного тока и тормозящего напряжения ограничивает электронный КПД на уровне 18%.

4. Электронная проводимость промежуточного резонатора тристроны, работающего в режиме с отсечкой тока, существенно зависит от фазы переменного напряжения, при которой сгустки входят в зазор, принимая при изменении фазы в пределах периода положительные и отрицательные значения, максимумы которых в 10-100 раз отличаются от их значений для однородного потока в режиме малого сигнала.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на 10-и научно-технических конференциях: седьмой Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков, Санкт-Петербург, СПбГПУ, 9-11 декабря 2003 г.; девятой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов “Радиотехника электроника и энергетика”, Москва, МЭИ, 4-5 марта 2003 г.; научной сессии МИФИ-2004, Москва, МИФИ, 2004 г.; десятой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов “Радиотехника электроника и энергетика”, Москва, МЭИ, 2-3 марта 2004 г.; международной научно-технической конференции “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2004”, Саратов, 15-16 сентября 2004 г.; пятнадцатой международной научно-технической конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”, Севастополь, 12-16 сентября 2005 г.; международной научно-технической конференции “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006”, Саратов, 20-21 сентября 2006 г.; 50-й студенческой научно-технической конференции РГРТА, Рязань, 2003 г.; 38-й научно-технической конференции РГРТА, Рязань, 2004 г.; 39-й научно-технической конференции РГРТУ, Рязань, 2006 г.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы, приложений. Ее объем составляет 164 страницы машинописного текста, включая 79 рисунков, 2 таблицы, 109 наименований цитируемых источников, из которых 14 - публикации автора диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы: обоснована актуальность темы; сформулированы цели и задачи работы; научная новизна и практическая значимость полученных результатов; представлены сведения о реализации результатов работы; перечислены основные положения, выносимые на защиту; приведены данные об апробации результатов, объеме и структуре работы.

Первая глава представляет собой обзор литературы по гибридным и генераторным приборам клистронного типа, особенностям их конструкций и основным параметрам, характеризующим процессы взаимодействия электронов с полями резонаторов этих приборов. Показано, что для гибридных приборов (клистронов и тристронов) не исследованы в широком диапазоне изменения регулируемых величин такие параметры, определяющие результат взаимодействия электронов с полями резонаторов, как электронная проводи-

мость, коэффициенты взаимодействия по току, коэффициент скоростной модуляции, электронный КПД; не установлены научно-обоснованные требования и рекомендации по выбору режимов и размеров области взаимодействия. Для генераторных приборов клистронного типа имеются противоречивые данные о расчетных значениях КПД.

Вторая глава посвящена разработке общей для всех приборов клистронного типа численно-аналитической математической модели взаимодействия электронов с полями резонаторов.

В настоящее время появилась тенденция - для сокращения времени счета использовать численно-аналитические модели. При проектировании конкретного прибора используют быстрые программы для предварительного расчета и оптимизации, а затем сложные для доработки конструкции и уточнения параметров. Такой подход использован и в этой работе. При разработке методики расчета нелинейных процессов взаимодействия электронов с полями резонаторов первоначально принят ряд допущений: рассматривается одномерная задача, не учитывается пространственный заряд. В дальнейшем связанные с этим погрешности оценены проведением проверочных расчетов с использованием более сложных моделей и программ.

Исходным уравнением для исследований является уравнение движения, которое с учетом принятых допущений записывается следующим образом: $m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -eE$, где m , e - масса и заряд электрона; z - текущая координата; t - время; $E = -\frac{U_m}{d} \sin(\omega t + \varphi)$ - напряженность поля плоского зазора; U_m - амплитуда переменного напряжения на зазоре; d - ширина зазора; ω - круговая частота; φ - начальная фаза переменного напряжения на зазоре.

Для общности и универсальности анализа введены **нормированные переменные**: $\Theta = \omega t$, $\xi = U_m / U_0$, $Z = z\omega / \vartheta_0$, $D = \omega d / \vartheta_0$ - угол пролета электронов в зазоре, где $\vartheta_0 = \sqrt{2eU_0 / m}$, U_0 - ускоряющее напряжение.

При численном моделировании процессов взаимодействия используется модель крупных частиц. В этом случае уравнение движения записывается для N крупных частиц, на которые разбивается участок потока (рис. 1).

$$\frac{\partial^2 Z_n}{\partial \Theta_{prn}^2} = \frac{1}{2} \frac{\xi}{D} \sin(\Theta_{prn} + \Phi_{0n} + \varphi), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где Φ_{0n} - начальная фаза n -й частицы, т.е. фаза (нормированное время) влета частицы в зазор; Θ_{prn} - нормированное время, отсчитываемое от момента влета n -й частицы в зазор.

Электронный поток, поступающий на вход резонатора, может быть как однородным, так и неоднородным в зависимости от разновидности прибора клистронного типа. Для однородного потока генераторных приборов (рис. 1, а), $\Phi_{0n} = \frac{2\pi}{2N}(2n-1) = \frac{\pi}{N}(2n-1)$. Для неоднородного потока гибридных

приборов без учета пролетных явлений (рис. 1, б) $\Phi_{0n} = \frac{2\Theta_{ots}}{2N} = \frac{\Theta_{ots}}{N}(2n-1)$, где Θ_{ots} - угол отсечки катодного тока. Для гибридных приборов с учетом пролетных явлений в пространстве сетка-катод (рис. 1, в) $\Phi_{0n} = \Theta_{ck}(2n-1)/N$. Для второго зазора резонатора с двойным зазором величина Φ_{0n} определяется фазой выхода n -го электрона из предыдущего зазора или резонатора и процессами в пролетном пространстве.

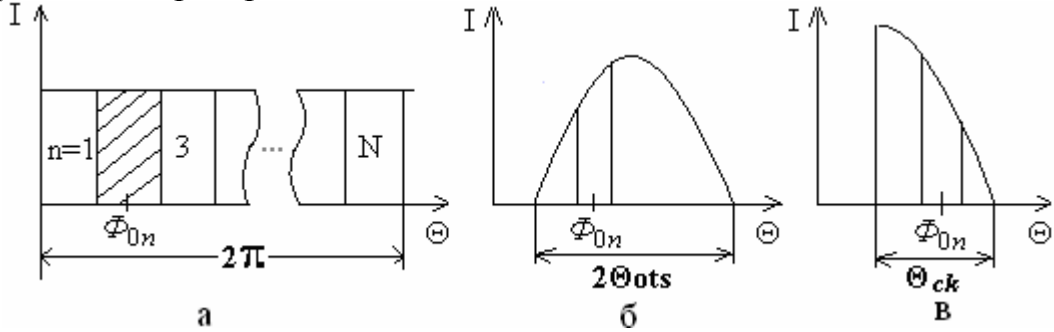


Рис. 1. Разбиение электронного потока на дискретные элементы: а - однородный поток; б - неоднородный поток в случае отсутствия пролетных явлений; в - неоднородный поток при наличии пролетных явлений

При решении уравнения движения (1) с учетом начальных и граничных условий $\frac{\partial Z_n}{\partial \Theta} = V_{0n}$ и $Z = Z_n$ при $\Theta_{prn} = 0$, где V_{0n} - нормированная скорость частиц на входе в зазор, Z_n - координата начала зазора, получаются известные выражения для скорости и координаты

$$V_n = V_{0n} + \frac{1}{2} \frac{\xi}{D} \cos(\Phi_{0n} + \varphi) - \frac{1}{2} \frac{\xi}{D} \cos(\Theta_{prn} + \Phi_{0n} + \varphi), \quad (2)$$

$$Z_n = Z_n + \left[V_{0n} + \frac{1}{2} \frac{\xi}{D} \cos(\Phi_{0n} + \varphi) \right] \Theta_{prn} + \frac{1}{2} \frac{\xi}{D} [\sin(\Phi_{0n} + \varphi) - \sin(\Theta_{prn} + \Phi_{0n} + \varphi)]. \quad (3)$$

Уравнения (2), (3) являются исходными для определения электронного КПД, конвекционного и наведенного тока, электронной проводимости, коэффициентов взаимодействия. Отношение ξ/D в уравнениях (2), (3) - это безразмерный комплекс, включающий все размерные величины, характеризующие плоский зазор с переменным напряжением. Параметры, входящие в отношение ξ/D , полностью характеризуют размеры и режим работы зазора, поэтому эту величину и каждый из его компонентов ξ или D можно использовать как параметр при анализе как линейных, так и **нелинейных процессов взаимодействия** в резонаторах приборов СВЧ, а само отношение ξ/D обозначено через δ и названо **универсальным параметром нелинейности**.

Для определения гармоник конвекционного и наведенного токов использовался анализ Фурье. В этом случае амплитуда k -й гармоники тока i_k определяется по формуле $i_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$, где a_k , b_k - коэффициенты Фурье, в данном случае это амплитуды активной и реактивной составляющих тока, k - номер гармоники.

Конвекционный ток определялся по фазам прибытия электронов Φ в заданную плоскость z_Φ . Для нормированных значений величин активной и реактивной составляющих конвекционного тока получены выражения

$$A_k = \frac{a_k}{I_0} = \Delta\Theta \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^N K_n \sin(k\Phi), \quad B_k = \frac{b_k}{I_0} = \Delta\Theta \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^N K_n \cos(k\Phi),$$

где $K_n = I(\Phi_{0n})/I_0$ – весовой коэффициент, учитывающий разный заряд частиц; $\Delta\Theta$ – шаг разбиения характерного участка потока на дискретные элементы; I_0 – постоянная составляющая тока.

Наведенный ток рассчитывался с использованием теоремы Шокли-Рамо. В этом случае для нормированных значений величин активной и реактивной составляющих наведенного тока получены следующие выражения:

$$A_k^{нав} = \frac{a_k^{нав}}{I_0} = \frac{2\Delta\Theta}{MD} \sum_n^N \sum_m^M K_n V_n(\Theta) \sin k\Theta, \quad B_k^{нав} = \frac{b_k^{нав}}{I_0} = \frac{2\Delta\Theta}{MD} \sum_n^N \sum_m^M K_n V_n(\Theta) \cos k\Theta,$$

где M – число разбиений периода 2π на интервалы $\Delta\Theta$.

Методика расчета **весовых коэффициентов** K_n и величины $\Delta\Theta$ различна для разных приборов клистронного типа с разным состоянием электронного потока, поступающего в исследуемый зазор. Для однородного электронного потока (рис. 1, а) $K_n = 1$, $\Delta\Theta = 2\pi/N$. Для неоднородного потока для таких приборов, как клистрод и тристрон, K_n рассчитывается исходя из формы импульсов конвекционного тока, поступающих из триодной части гибридного прибора. В случае отсутствия пролетных явлений (рис. 1, б)

$$K_n = \frac{(\cos \Phi_{0n} - \cos \Theta_{ots})^{3/2}}{\frac{\Delta\Theta}{2\pi} \sum_{n=1}^N (\cos \Phi_{0n} - \cos \Theta_{ots})^{3/2}}, \quad \Delta\Theta = \frac{2\Theta_{ots}}{N}.$$

Введение величин δ и K_n позволило анализировать процессы взаимодействия в разных приборах клистронного типа по единой методике с использованием одной и той же программы.

Для расчета нормированных величин составляющих **электронной проводимости** использовались выражения $G_e^{ноп} = \frac{G_e}{G_0} = \frac{A_1^{нав}}{\xi}$, $B_e^{ноп} = \frac{B_e}{G_0} = \frac{B_1^{нав}}{\xi}$, где $G_0 = I_0/U_0$ – проводимость луча.

Электронный КПД определялся двумя способами: по изменению кинетической энергии электронов при прохождении зазора $\eta_e = \sum_{n=1}^N (K_n V_{вых}^2 - K_n V_{вх}^2) / \sum_{n=1}^N K_n$ и через активную составляющую P_{ea} мощности, отдаваемой потоком полю зазора (активную составляющую наведенного тока) $\eta_e = P_{ea}/P_0 = 0,5\xi I_{1a}^{нав}$. Здесь $V_{вх}$, $V_{вых}$ – нормированные значения скоростей частиц на входе и выходе зазора, P_0 – подводимая мощность.

Были также получены выражения для **коэффициентов взаимодействия** электронов с полем зазора по току и по скоростям в нелинейном режиме.

В третьей главе с использованием разработанной численно-аналитической математической модели и программы на ее основе было проведено исследование нелинейных процессов взаимодействия в клистродах и тристродах с одно- и двухзазорными выходными резонаторами и в автогенераторах на одно- и двухзазорных резонаторах.

Целью исследования для **клистронов и тристронов** с одно- и двухзазорными выходными резонаторами было определение значений и условий получения максимального КПД. Предельные значения электронного КПД определялись последовательным перебором значений регулируемых параметров в широких пределах и нахождением экстремальных точек. Для клистрода и тристрода с однозазорным выходным резонатором пределы изменения параметров были $\Theta_{ots} = \pi/4 \div \pi$, $D = \pi/8 \div 2\pi$, $\xi = 0,2 \div 2,5$, $\varphi = 0 \div 2\pi$. Для клистрода и тристрода с двухзазорным выходным резонатором размеры и электрический режим работы зазоров считался одинаковым, т.е. $D_1 = D_2 = D$, $\xi_1 = \xi_2 = \xi$, а пределы изменения регулируемых параметров были следующие: $\Theta_{ots} = \pi/4 \div \pi$, $D = \pi/8 \div \pi$, $\xi = 0,1 \div 0,8$, $\varphi = 0 \div 2\pi$, $L = 0 \div 2\pi$ (где L - нормированная длина трубы дрейфа). Всего было рассчитано и обработано с использованием сервисных программ около 1000000 вариантов.

В клистроде с однозазорным выходным резонатором для каждого варианта определялась оптимальная фаза входа сгустка в зазор φ_{onm} , при которой η_e максимален (рис. 2). Экстремальные точки семейства кривых (η_{extr} , φ_{onm}) на рис. 2 дают одну кривую зависимостей η_{extr} от ξ при фиксированных D и $\Theta_{ots} = \pi/2$ на рис. 3.

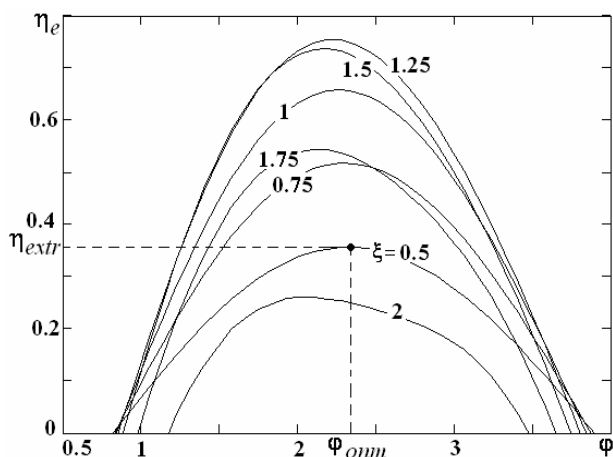


Рис. 2. Зависимость КПД от фазы φ входа сгустка в зазор при разных ξ для $\Theta_{ots} = \pi/2$ и $D = \pi/2$

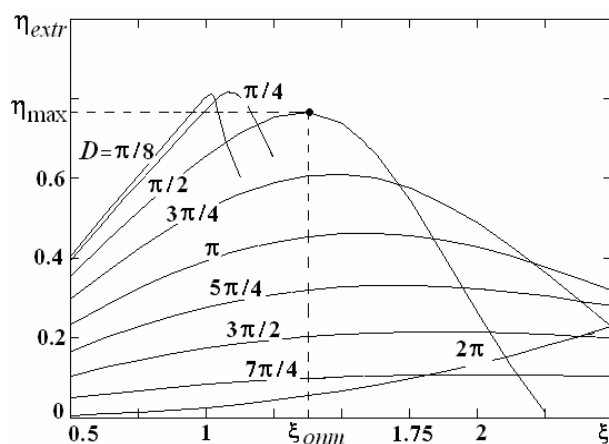


Рис. 3. Зависимость η_{extr} при φ_{onm} от ξ при разных значениях ширины зазора D и $\Theta_{ots} = \pi/2$

Экстремальные значения кривых на рис. 3 являются максимально возможными значениями КПД η_{max} при данной ширине зазора и Θ_{ots} . Видно, что при $\Theta_{ots} = \pi/2$ предельный электронный КПД клистрода с однозазорным выходным резонатором составит 82% при $D = \pi/4$ и $\xi_{onm} = 1,2$. Подобные исследования были проведены для тристрода с однозазорным выходным

резонатором. Установлено, что при угле отсечки $\Theta_{ots} = \pi/2$, предельное значение электронного КПД составит 89% при $D = \pi/4$ и $\xi_{onm} = 1,25$.

Аналогичные исследования были проведены для клистрода и тристро-на с двухззорными выходными резонаторами. В качестве примера на рис. 4 и 5 представлены зависимости значений КПД η_e при оптимальных φ от длины пролета между зазорами L при разных ξ . Из рис. 4 видно, что для клист-рода с двухззорным выходным резонатором на π -виде при угле отсечки $\Theta_{ots} = \pi/2$, $D = \pi/4$, $\xi = 0,6$ и $L_{onm} = 1,18 \text{ рад}$ предельный электронный КПД составит 86%. Из рис. 5 следует, что предельное значение электронного КПД тристро-на с двухззорным выходным резонатором на π -виде при угле отсечки $\Theta_{ots} = \pi/2$ и $D_1 = D_2 = \pi/4$ составляет 92% при $\xi = 0,7$ и $L_{onm} = 0,98 \text{ рад}$. Из рис. 4 и 5 также следует, что в нелинейном режиме для получения максимального электронного КПД в гибридных приборах клист-ронного типа с двухззорными резонаторами следует существенно сокра-щать длину пролета L и расстояние между серединами зазоров: в 1,6 раза (с 3,14 до 2 рад) в клистроде и в 1,8 раза (с 3,14 до 1,76 рад) в тристроне.

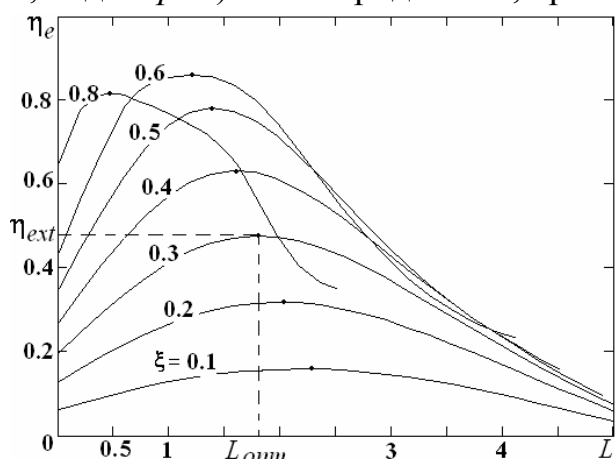


Рис. 4. Зависимости значений η_e клистрода при оптимальных φ от L при разных ξ ($D = \pi/4$, $\Theta_{ots} = \pi/2$)

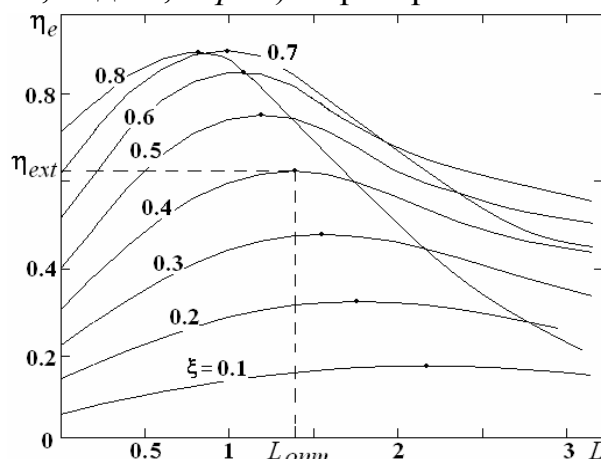


Рис. 5. Зависимости значений η_e тристро-на при оптимальных φ от L при разных ξ ($D = \pi/4$, $\Theta_{ots} = \pi/2$)

Как обобщенный результат исследований на рис. 6 приведены зависи-мости максимальных значений КПД при оптимальных ξ, D, φ, L от угла от-сечки Θ_{ots} для клистрода с одно- и двухззорным выходным резонатором и для тристро-на с одно- и двухззорным выходным резонатором.

С целью определения погрешности и пределов использования резуль-татов, полученных без учета пространственного заряда, в работе **проводил-ось исследование влияния пространственного заряда** на КПД клистрода с одно- и двухззорным выходным резонатором. Расчеты проводились по программе анализа двумерных динамических процессов в клистро-нах для произвольно взятых режимов с высоким КПД при разных значениях приве-денного радиуса потока γb . В качестве параметра пространственного заряда использовался микроперванс потока P_{μ} , определяемый по среднему значе-

нию тока. На рис. 7 приведены результаты расчетов для однозазорного резонатора. В целом было установлено, что полученные ранее результаты по КПД с погрешностью не более 3% можно применять для потоков с обычно встречающимся первеансом от 0,1 до 0,5 $\text{мкА}/\text{В}^{3/2}$.

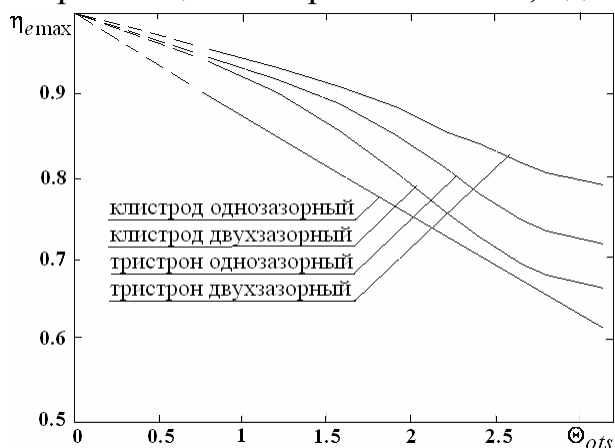


Рис. 6. Зависимости максимальных КПД клистрода и тристрона от угла отсечки катодного тока

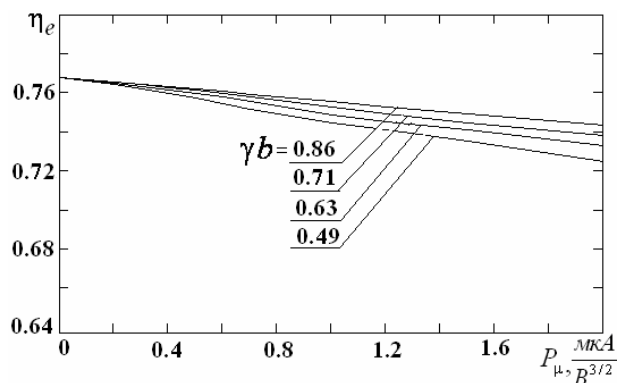


Рис. 7. Зависимости значений η_e от первеанса и приведенного радиуса электронного потока (клистрод с однозазорным выходным резонатором)

Для того чтобы результаты, полученные в приближении плоского зазора, можно было использовать для бессеточных зазоров, необходимо установить эквивалентность зазоров. Для пролетных клистронов такая эквивалентность устанавливается равенством коэффициентов взаимодействия. Для подтверждения возможности использования такой эквивалентности для гибридных приборов были проведены дополнительные исследования с использованием программы двумерного анализа. На рис. 8 приведены зависимости разницы значений КПД, полученных по программе на основе численно-аналитической модели и программе анализа двумерных динамических процессов, $\Delta \eta_e = \eta_e - \eta_{e \text{экв}}$ от γa при $b/a = 0,4$ и $0,8$ для режима бессеточного зазора $\Theta_{ots} = \pi/2$, $\xi = 1,4$, $D = \pi/2$. Видно, что во всем диапазоне исследуемых величин γa и b/a расхождение не превышает 2%. Таким образом, для гибридных приборов подтверждена возможность установления эквивалентности сеточных и бессеточных зазоров с помощью равенства коэффициентов взаимодействия.

В промежуточных догруппирующих резонаторах гибридных приборов основными параметрами являются электронная проводимость и коэффициенты взаимодействия по току и скорости. Исследование электронной проводимости промежуточного резонатора тристрона проводилось при разных фазах входа переднего фронта сгустков в зазор, $D = \pi/2$, $\Theta_{ots} = 90^\circ$, $\xi = 0,1 \div 0,9$. На рис. 9 приведены зависимости электронной проводимости от сдвига фазы ϕ_1 между переменным напряжением на зазоре и первой гармоникой наведенного тока при $D = \pi/2$, $\Theta_{ots} = 90^\circ$. Из рис. 9 видна значительная зависимость электронной проводимости от амплитуды переменного напряжения. При изменении ϕ_1 в пределах от $0 \div 2\pi$ электронная проводимость меняет знак, а ее

максимальные значения в 10-100 раз отличаются от этих значений для однородного потока в режиме малого сигнала, где при $D = \pi/2$ G_e / G_0 постоянна и равна 0,09. При исследовании коэффициентов взаимодействия по току и скорости промежуточного резонатора тристрона в нелинейном режиме расчеты показали, что в усилительном режиме ($\varphi_I \rightarrow \pi/2$) при расчетах коэффициента взаимодействия по току и скорости с погрешностью не более 4% можно пользоваться соотношением для режима малого сигнала и сплошного потока.

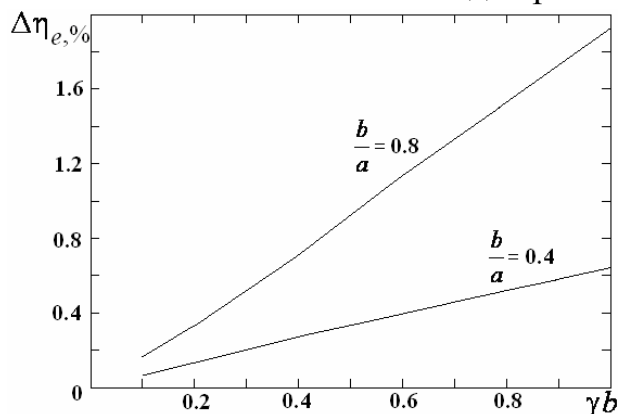


Рис. 8. Разница электронных КПД сеточного и эквивалентного бессточного зазора от нормированного радиуса пролетной трубы γa

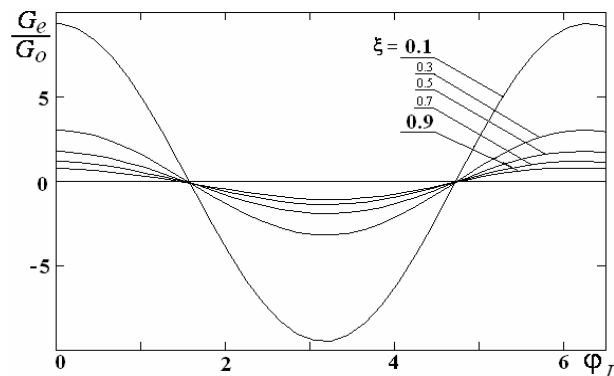


Рис. 9. Зависимость активной составляющей электронной проводимости от сдвига фаз между первой гармоникой наведённого тока и напряжением на зазоре

В СВЧ зазорах с однородным электронным потоком, являющихся элементами многих приборов СВЧ, в том числе и **генераторных**, с использованием универсального параметра нелинейности δ и нормированных переменных, проведен расчет графиков движения, конвекционного и наведенного токов, электронной проводимости и КПД в широком диапазоне изменения длин зазоров и δ .

На рис. 10 приведены зависимости активной G_e составляющей электронной проводимости от длины зазора D при разных значениях критерия подобия δ . При $\delta \rightarrow 0$ эти зависимости совпадают с известным аналитическим решением для режима малого сигнала, что являлось одним из тестов правильности алгоритма и программы расчетов. С ростом δ в нелинейном режиме появляются существенные отличия от линейного режима. Электронная проводимость в областях отрицательных значений, где возможна автогенерация, уменьшается по абсолютной величине с ростом δ от малосигнальных значений до 0, а затем становится положительной.

При исследовании конвекционного тока установлено, что СВЧ зазор в режиме большого сигнала может быть эффективным группирователем электронов, конвекционный ток внутри зазора конечной длины может достигать значения $1,48I_0$ при $\delta = 1$, что больше величины $1,16I_0$ при синусоидальной скоростной модуляции бесконечно узким зазором.

Исследование электронного КПД в зонах отрицательной электронной проводимости показало, что максимальное значение электронного КПД в

первой зоне составляет 18% при $\delta=0,5$, а во второй зоне 14% при $\delta=0,3$. Таким образом, при больших значениях конвекционного и наведенного тока в нелинейных режимах электронный КПД оказывается небольшим. Анализ графиков движения (рис. 11) совместно с графиком изменения переменного напряжения на зазоре позволил установить, что фазовый сдвиг между максимумами конвекционного тока и тормозящего напряжения приводит к уменьшению КПД и исчезновению условий автогенерации. В работах, посвященных монодрону, не были исследованы и не были выявлены причины невысокого значения КПД.

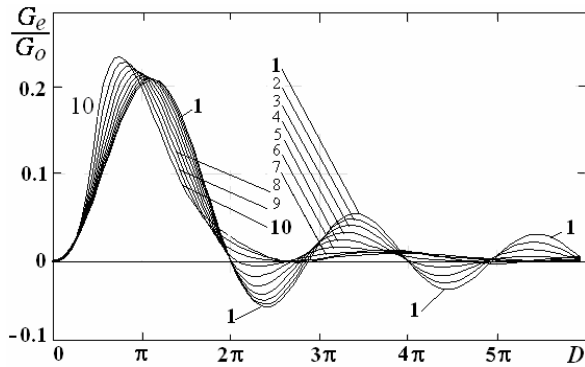


Рис. 10. Активная составляющая электронной проводимости. Кривые 1-10 соответствуют $\delta=0,05$; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1

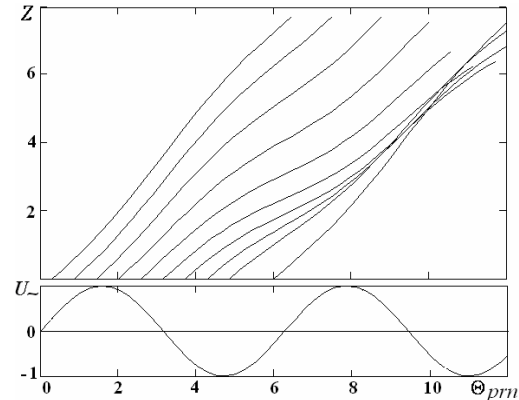


Рис. 11. Графики движения электронов $Z = f(\Theta_{prn})$ при $\delta=0,5$ и синусоида переменного напряжения на зазоре

Альтернативой монодронной конструкции может быть конструкция автогенератора на двухзазорном резонаторе, в которой возможно получение большего значения КПД. При исследовании электронной проводимости двухзазорного резонатора с зазорами одинаковой длины установлено, что в нелинейном режиме появляются существенные отличия от линейного режима. Исследование электронного КПД в зонах отрицательной электронной проводимости показало, что максимальное значение электронного КПД на π -виде колебаний соответствует второй зоне генерации и составляет 28%, для нулевого вида - первой зоне и составляет 29%. Добиться увеличения КПД можно, если использовать в двухзазорном резонаторе зазоры разной длины. В такой конструкции автогенератора на π -виде колебаний с помощью оптимизационных расчетов найдено максимальное значение электронного КПД - 51% при $D_1 = 4,5 \text{ рад}$, $L_{\text{ц}} = 7,15 \text{ рад}$, $D_2 = 1,42 \text{ рад}$, $\xi = 1,4$ и установлено, что для получения максимального электронного КПД в нелинейном режиме расстояние между центрами зазоров должно быть уменьшено в 1,1 раза с 7,85 до 7,15 рад.

Как и для гибридных приборов, для генераторных приборов была проведена оценка влияния пространственного заряда и неоднородности поля зазора на КПД. Показано, что максимальное уменьшение КПД из-за влияния пространственного заряда не превышает 2,5% при $P_{\mu} = 0 \div 0,5 \text{ мкА}/B^{3/2}$ и что результаты, полученные для плоского зазора с максимальной погрешностью

5%, могут быть использованы для бессеточных зазоров при условии эквивалентности зазоров по коэффициенту взаимодействия.

В четвертой главе с использованием полученных результатов и рекомендаций было проведено проектирование области взаимодействия телевизионного тристрона с двухзазорным выходным резонатором. Приведена структурная схема проектирования.

На этапе предварительного расчета по заданной мощности, ускоряющему напряжению и частоте сигнала определен общий ток, выбрана 4-х лучевая конструкция. С использованием полученных рекомендаций были выбраны размеры и режимы области взаимодействия промежуточного и выходного двухзазорных резонаторов, обеспечивающие максимальное значение КПД 91%.

Далее было проведено проектирование ЭОС. При проектировании пушки триодной части предварительно синтезировалась, а затем методом многовариантного анализа уточнялась технологичная форма электродов пушки без сетки. После этого с помощью программы двумерного анализа проводилась отработка конструкции пушки с сеткой. После отработки конструкции пушки проводился расчет траекторий в клистронной части в экспериментально измеренном в ФГУП “НПП “Контакт” магнитном поле.

Далее проводилось моделирование динамического режима тристрона в режиме заданных переменных напряжений, расстроек и размеров ВЧ зазоров и труб дрейфа клистронной части, полученных ранее на этапе предварительного расчета. В ходе расчетов была скорректирована геометрия области взаимодействия. Расчетное значение электронного КПД в оптимизированном узкополосном режиме составило 90%. После этого был проведен расчет тристрона по программе двумерного анализа в самосогласованном режиме. При этом для получения полосы 8 МГц добротность промежуточного резонатора была уменьшена с 800 до 100. При этих условиях в самосогласованном режиме максимальный электронный КПД составил 68%.

С использованием полученных рекомендаций по размерам зазоров, пролетных труб, а также режима работы зазоров в ФГУП “НПП “Контакт” под руководством проф. В.А. Царева был изготовлен и испытан опытный образец телевизионного тристрона. В режиме узкополосного усиления при угле отсечки катодного тока 77° в эксперименте было получено значение КПД по мощности в нагрузку 90% и выходная мощность 10,6 кВт. Расчетное значение КПД в этом режиме с помощью численно-аналитической модели составило 90,5%, выходная мощность 10,8 кВт, что свидетельствует о хорошем соответствии результатов расчета и эксперимента. Таким образом, результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что тристрон в оптимизированном режиме может обеспечить КПД 90%.

Для режима усиления телевизионного сигнала с полосой пропускания 8 МГц на уровне 1 дБ расчетный КПД в режиме синхроимпульсов составил 68%, экспериментальный 64%, что почти в 2 раза больше, чем у телевизион-

ного клистрона КУ-318, на замену которого в телевизионном передатчике “Ильмень” предназначен разрабатываемый тристрон.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, приведен список работ, опубликованных по результатам исследований.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана численно-аналитическая математическая модель процессов взаимодействия электронов с полями резонаторов гибридных и генераторных приборов клистронного типа. Сочетание численных и аналитических методов позволило создать быстродействующую программу и вести оперативный анализ процессов взаимодействия в СВЧ зазорах резонаторов.

2. Введение нормированных переменных и использование универсального параметра нелинейности $\delta = \frac{U_m \vartheta_0}{U_0 \omega d}$ позволило получить универсальные результаты, справедливые при разных сочетаниях 4-х параметров размеров и режимов работы зазора, входящих в δ .

3. Введение весового коэффициента K_n для заряда крупных частиц и разработанная методика его расчета для входных импульсов тока разной формы позволили проводить анализ нелинейных процессов взаимодействия электронов с полями зазоров резонаторов разных приборов клистронного типа.

4. Проанализированы процессы взаимодействия в гибридных приборах типа триод-клистрон – клистродах и тристродах. Определено, что в приближении плоского зазора при рекомендованном угле отсечки 90° :

- в клистроде с одноззорным выходным резонатором для получения максимального электронного КПД 82% приведенная длина зазора должна составлять $D = \pi/4$ при нормированной амплитуде напряжения $\xi = 1,2$;

- в клистроде с двухззорным выходным резонатором на π -виде колебаний для получения максимального электронного КПД 86% приведенные длины зазоров должны составлять $D_1 = D_2 = \pi/4$ при $\xi_1 = \xi_2 = 0,6$ и нормированном расстоянии между центрами зазоров $L_{\text{ц}} = 1,96 \text{ рад}$;

- в тристроне с одноззорным выходным резонатором для получения максимального электронного КПД 89% приведенная длина зазора должна составлять $D = \pi/4$ при нормированной амплитуде напряжения $\xi = 1,25$;

- в тристроне с двухззорным выходным резонатором на π -виде для получения максимального электронного КПД 92% приведенные длины зазоров должны составлять $D_1 = D_2 = \pi/4$ при $\xi_1 = \xi_2 = 0,7$ и нормированном расстоянии между центрами зазоров $1,76 \text{ рад}$.

5. С помощью равенства коэффициентов взаимодействия установлены условия эквивалентности сеточных и бессеточных зазоров, позволяющие применять результаты, полученные для сеточных зазоров к бессеточным.

6. Определены максимальные значения электронного КПД автогенераторов на резонаторе с двумя зазорами взаимодействия:

- для резонатора с двумя идентичными зазорами максимальное значение электронного КПД на π -виде колебаний соответствует второй зоне генерации и составляет 28%, для нулевого вида - первой зоне и составляет 29%;

- для резонатора с зазорами разной длины на π -виде колебаний максимальное значение электронного КПД составляет 51%.

7. При исследовании процессов взаимодействия в протяженных зазорах выявлены следующие закономерности:

- СВЧ зазор в режиме большого сигнала может быть эффективным группирователем электронов, конвекционный ток внутри зазора конечной длины при $\delta > 0,5$ может быть больше, чем в пространстве группирования при синусоидальной скоростной модуляции бесконечно узким зазором и может достигать значения $1,48I_0$ при $\delta = 1$;

- активная и реактивная составляющие электронной проводимости в нелинейном режиме существенно зависят от критерия δ , электронная проводимость в областях отрицательных значений, где возможна автогенерация, уменьшается по абсолютной величине с ростом δ от малосигнальных значений до 0, а затем становится положительной;

- электронный КПД в зонах автогенерации монотрона зависит от δ , имеются оптимальные значения δ , при которых КПД максимален и составляет 18% при $\delta = 0,5$ в первой зоне и 14% при $\delta = 0,3$ во второй зоне;

- действие пространственного заряда уменьшает электронный КПД монотрона, но в области обычно используемых в приборах СВЧ значений микроперванса $(0,1 \div 0,5) \text{ мкА}/B^{3/2}$ и приведенного радиуса электронного потока $0,5 \div 0,8$ уменьшение КПД не превышает 2,5%.

8. Выявлена необходимость сокращения в нелинейном режиме расстояния между центрами зазоров двухзазорного выходного резонатора для получения максимального КПД: в клистроне в 1,6 раза - с 3,14 до 2 *рад*, в тристроне в 1,8 раза - с 3,14 до 1,76 *рад*, в автогенераторе на двухзазорном резонаторе в 1,1 раза с 7,85 до 7,15 *рад*.

9. С использованием рекомендаций по размерам зазоров, пролетных труб, а также режима работы зазоров в ФГУП "НПП "Контакт" был изготовлен и испытан опытный образец телевизионного тристрона.

10. Результаты эксперимента подтвердили возможность получения в тристроне КПД 90%.

Основные результаты опубликованы в следующих работах

1. Пашков А.А. Клистрод - высокоэффективный прибор для ТВ вещания // Тез. докл. "7-я Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков", 9-11 декабря 2003 г. С-Пб: СПбГПУ, 2003. С. 54-55.

2. Крючков А.В., Пашков А.А., Рыбачек В.П. Компьютерное моделирование ЭОС многолучевого клистрода // Тез. докл. девятой междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов "Радиотехника электроника и энергетика", 4-5 марта 2003 г. Москва: МЭИ, 2003. Т. 1. С. 177-178.

3. Пашков А.А. Расчет предельно достижимых КПД клистрода // Тез. докл. десятой междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов “Радиотехника электроника и энергетика”, 2-3 марта 2004 г. Москва: МЭИ, 2004. Т. 1. С. 200.
4. Пашков А.А. Исследование параметров СВЧ зазора в нелинейном режиме // Научная сессия МИФИ-2004: Сб. науч. тр. Москва: МИФИ, 2004. Т. 1. С. 175-176.
5. Пашков А.А. Универсальные графики движения электронов в плоском СВЧ зазоре // Информационные технологии в электронике: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТА, 2004. С. 88-93.
6. Федяев В.К., Пашков А.А. О предельных КПД клистрода // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. 2004. Вып. 2(484). С. 54- 59.
7. Федяев В.К., Пашков А.А. Исследование процессов преобразования энергии в клистроде с двухзазорным выходным резонатором // Материалы междунар. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2004”, 15-16 сентября 2004 г. Саратов: СГТУ, 2004. С. 104-109.
8. Федяев В.К., Пашков А.А., Кадушкин В.О. Исследование электронной проводимости и КПД двухзазорного резонатора в режимах генерации и усиления // Материалы междунар. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2004”, 15-16 сентября 2004 г. Саратов: СГТУ, 2004. С. 109-115.
9. Федяев В.К., Пашков А.А. Электронная проводимость и коэффициент полезного действия плоского сверхвысокочастотного зазора в нелинейном режиме // Радиотехника и электроника. Т. 50, № 3. 2005. С. 361-365.
10. Федяев В.К., Пашков А.А., Горлин О.А. Исследование параметров одиночных и двойных СВЧ зазоров в нелинейном режиме // Материалы конф. “15-я международная крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”, 12-16 сентября 2005 г. Севастополь, 2005. Т. 1. С. 201-202.
11. Пашков А.А., Илларионов Ю. И. Методика моделирования нелинейных процессов взаимодействия электронов с полями зазоров приборов клистронного типа // Вестник РГРТА. Вып. 18. Рязань, 2006. С. 105-107.
12. Федяев В.К., Юркин В.И., Пашков А.А. Влияние пространственного заряда на электронную проводимость и КПД монотрона //Электроника: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2006. С. 53-57.
13. Федяев В.К., Горлин О.А., Пашков А.А. Исследование электронного КПД автогенератора на двухзазорном резонаторе с зазорами разной длины // Материалы междунар. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006”, 19-21 сентября 2006 г. Саратов: СГТУ, 2006. С. 36-42.
14. Федяев В.К., Илларионов Ю.И., Пашков А.А. Электронная проводимость промежуточного резонатора тристроны // Материалы междунар. конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006”, 19-21 сентября 2006 г. Саратов: СГТУ, 2006. С. 42-47.

Пашков Андрей Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОЛЯМИ РЕЗОНАТОРОВ
ГИБРИДНЫХ И ГЕНЕРАТОРНЫХ ПРИБОРОВ КЛИСТРОННОГО
ТИПА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 11.01.2007 г. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз.

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