

На правах рукописи



ГОРЛИН ОЛЕГ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ОДНО- И МНОГОЛУЧЕВЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ
НА ДВУХАЗОРНЫХ РЕЗОНАТОРАХ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2010

Работа выполнена на кафедре «Электронные приборы» ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Федяев Валерий Кузьмич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Григорьев Андрей Дмитриевич

доктор технических наук, профессор
Царёв Владислав Алексеевич

Ведущее предприятие: **ФГУП «НПП «Торий», г. Москва**

Защита состоится «12» октября 2010 г. в зале ученого совета, аудитория 235, в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

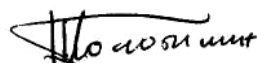
Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «30» августа 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.211.03

д-р техн. наук, профессор



Б.И. Колотилин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В связи с возрастающим использованием микроволнового излучения для промышленных и технологических целей начался поиск простых по конструкции источников СВЧ энергии средней и большой мощности с достаточно высоким КПД. В первую очередь внимание специалистов привлек известный с 30-х годов 20-го века моноотрон. В первых экспериментальных образцах монотронов был получен КПД менее 1 %, и на долгие годы интерес к моноотронам был потерян. В последнее время появились публикации по теоретическим расчетам автогенераторов на основе моноотрона: была предсказана возможность получения КПД 18 % на мощности 100 киловатт, возможность увеличения электронного КПД до 33 % в коаксиальном моноотроне – диотроне, теоретически показана возможность увеличения КПД до 50 % в двухсекционном моноотроне с диафрагмой. Особенностью монотронов является то, что амплитуда переменного напряжения на зазоре взаимодействия должна в несколько раз превышать ускоряющее напряжение.

Альтернативой моноотронным конструкциям может быть генератор на одном резонаторе с двумя зазорами, разделенными пролетной трубой, с амплитудами напряжений на зазорах, примерно равными ускоряющему напряжению. Двухзазорный резонатор впервые был предложен в виде резонансного отрезка коаксиальной линии, во внешней трубе и внутреннем проводнике которой сделаны соосные отверстия для прохождения электронного потока. Края отверстий образуют два высокочастотных зазора взаимодействия. В таком резонаторе переменные напряжения на зазорах имеют одинаковую амплитуду и противофазны (π -вид колебаний). Другой разновидностью двухзазорного резонатора является резонатор с “плавающей” трубкой дрейфа. В таком резонаторе через зазоры протекает общий ток и напряжения на зазорах синфазны (нулевой вид колебаний). Двухзазорные конструкции нашли довольно широкое применение в многорезонаторных клистронах для скоростной модуляции электронов во входном и промежуточных резонаторах и отбора энергии в выходном резонаторе. Исследованию электронной проводимости и коэффициента взаимодействия для такого применения двухзазорных конструкций посвящено много работ.

Вопросами возможности использования двухзазорных резонаторов в качестве автогенераторов начиная с 30-х годов прошлого века занимались многие отечественные и зарубежные учёные: А.Н. Арсеньева, О. Хайль,

Ю.А. Кацман, С.Д. Гвоздовер, Л.Н. Лошаков, В.М. Лопухин, М. Чодоров, С. Фан, Р.Б. Нельсон, В.П. Панов, В.А. Царёв и др. При этом экспериментально было получено значение КПД не более 25 %, что явилось следствием отсутствия в то время возможностей численного математического моделирования нелинейных режимов и оптимизации параметров.

В связи с появившейся потребностью в простых по конструкции автогенераторах СВЧ настало время провести с использованием современных вычислительных средств оптимизационные расчеты двухзазорных автогенераторов, в том числе многолучевых, и определить их возможности как источников микроволнового излучения средней и большой мощности, что является актуальной задачей.

Цель работы и задачи исследований

Целью настоящей диссертационной работы является исследование нелинейных процессов взаимодействия электронов с полями в одно- и многолучевых автогенераторах СВЧ на двухзазорных резонаторах и нахождение параметров, обеспечивающих оптимальные режимы работы прибора, а также использование полученных результатов для проектирования конкретных автогенераторов на двухзазорных резонаторах.

Для достижения поставленной цели в работе решались **следующие задачи:**

- проведение аналитического обзора публикаций по генераторам СВЧ простой конструкции и двухзазорным резонаторам;
- определение условий самовозбуждения генераторов на двухзазорных резонаторах;
- модернизация программы экспресс-анализа применительно к особенностям автогенераторов на двухзазорных резонаторах;
- оптимизация по КПД параметров автогенераторов на двухзазорных резонаторах на π - и 0-виде колебаний в шести зонах генерации с использованием численно-аналитической модели и программы экспресс-анализа;
- исследование влияния различных факторов: пространственного заряда, неоднородностей полей бессеточных зазоров, а для многолучевых многорядных конструкций также нелинейного распределения электрических полей в зазорах – на оптимальные параметры и КПД автогенераторов;
- получение рекомендаций по выбору параметров и режимов,

обеспечивающих максимальный КПД автогенераторов на двухзазорных резонаторах;

– разработка методики проектирования многолучевых многорядных автогенераторов на основе пакета прикладных программ разного уровня;

– сопоставление расчетных и экспериментальных параметров автогенераторов.

Научная новизна выполненных исследований заключается в том, что впервые:

1. Установлены основные закономерности преобразования энергии в автогенераторах на двухзазорных резонаторах и для шести зон генерации оптимизированы внутренние параметры с целью получения максимального КПД.

2. Показано, что при переходе от линейного режима малых амплитуд к нелинейным режимам для получения предельных значений КПД необходимо изменять размеры элементов двухзазорных резонаторов таким образом, чтобы при выполнении фазовых условий самовозбуждения максимум первой гармоники конвекционного тока приходился на область второго зазора.

3. Показано, что с увеличением номера зоны n для получения максимальных значений КПД необходимо увеличивать длину первого зазора D_n ; получены аппроксимационные соотношения для расчета D_n : для π -вида $D_n = D_1 + 1.05 - 0.4^{(n-1)}$, для 0-вида $D_n = D_0 + 1.5 - 0.6^n$.

4. Идентифицирован механизм увеличения КПД с ростом номера зоны n : КПД в центре зон растет с увеличением n для π -вида колебаний с 14 % на нулевой зоне до 65 % на пятой, для нулевого вида – с 40 % на нулевой зоне до 66 % на пятой, в основном за счёт уменьшения потерь на скоростную модуляцию в первом зазоре.

5. Выявлено, что в многолучевой двухрядной конструкции генератора из-за различия амплитуд напряжений на зазорах разных рядов и нелинейного изменения напряжения по продольной координате длинного первого зазора не совпадают условия реализации максимального КПД для лучей разных рядов, что приводит к уменьшению общего КПД по сравнению с однолучевым генератором (для 30-лучевого двухсекционного генератора сантиметрового диапазона на нулевой зоне 0-вида с 40 % до 34 %, для первой зоны π -вида с 51 % до 42 %).

6. Установлено, что в многорядной конструкции с длинным первым зазором концентрация электрического поля у торца зазора сдвигает центр эквивалентного зазора в сторону торца, что приводит к увеличению

оптимальной длины пролётной трубы примерно на 15 % по сравнению со случаем однородного поля.

7. Проведена апробация расчетных моделей путем сопоставления расчётных данных с результатами эксперимента, выполненного М.Чодоровым и С.Фаном на макете двухзазорного автогенератора с регулируемыми зазорами с максимальным КПД 24 %. Расхождение по КПД расчетных и экспериментальных значений и зависимостей составило не более 2.5 %.

Достоверность теоретических результатов обеспечивается построением математических моделей на основе фундаментальных исходных уравнений и законов, корректностью упрощающих предположений, соответствием результатов расчета и решений тестовых задач, а также соответствием расчетных и экспериментальных параметров автогенераторов.

Практическая значимость состоит в следующем:

1. Получены соотношения для расчета амплитудных условий самовозбуждения генераторов на двухзазорных резонаторах, для пускового тока и минимального первеанса потока.

2. Для шести зон генерации 0- и π -вида колебаний определены конкретные значения нормированных размеров и режимов, необходимых для получения максимальных значений КПД автогенераторов.

3. Рекомендовано для практического применения в качестве автогенераторов на π -виде колебаний использовать двухзазорные резонаторы, работающие на первой зоне с электронным КПД 50 % и на второй зоне с КПД 60 %, а на 0-виде использовать резонаторы, работающие на первой зоне с КПД 57 % и на нулевой зоне с КПД 40 %.

4. Установлен критерий эквивалентности по КПД автогенераторов с сеточными и бессеточными зазорами на основе равенства их коэффициентов взаимодействия.

5. Разработана методика проектирования многолучевых автогенераторов, основанная на использовании пакета прикладных программ разного уровня для расчета электронных процессов и проектирования электродинамических систем.

6. Разработана и реализована методика установления требуемого соотношения напряжений на зазорах на 0-виде колебаний путем введения индуктивного выступа резонатора за область второго зазора.

7. Показано, что в четырёхлучевом телевизионном клистроде с двухзазорным выходным резонатором при ускоряющем напряжении 9 кВ возможна автогенерация на нулевой зоне 0-вида с КПД около 40 %. В эксперименте был получен КПД 44 % при ускоряющем напряжении 9.1 кВ .

8. Выполнено проектирование трёх вариантов 30-лучевых двухрядных двухсекционных автогенераторов на двухзазорных резонаторах на выходную мощность 240 кВт с КПД 30 % на длине волны 5.45 см с ускоряющим напряжением 24 кВ и общим током 33.6 А . Результаты проектирования переданы в ФГУП «НПП «Исток» для изготовления экспериментальных образцов автогенератора.

Реализация результатов работы

Результаты работы и практические рекомендации по проектированию одно- и многолучевых автогенераторов на двухзазорных резонаторах:

– используются в ФГУП «НПП «Исток» при разработке двухсекционного 30-лучевого автогенератора на двухзазорном резонаторе с выходной мощностью 240 кВт на частоте 5.45 ГГц ;

– использованы в ОАО «НПП «Контакт» (г.Саратов) при сопоставлении расчетных и экспериментальных параметров автогенератора на базе клистрода с двухзазорным выходным резонатором;

– используются в учебном процессе РГРТУ в курсах “Вакуумная и плазменная электроника”, “Физические основы электроники”, “Приборы с комбинированным управлением током”, а также при выполнении дипломных проектов и курсовых работ.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Для автогенератора на двухзазорном резонаторе на π -виде колебаний с одинаковыми амплитудами напряжений на зазорах оптимальный по КПД режим, когда максимум первой гармоники тока приходится на область второго зазора, достигается при определенной длине первого зазора D_n , которая с увеличением номера зоны n с погрешностью не более 5 % определяется по аппроксимационному соотношению $D_n = D_1 + 1.05 - 0.4^{(n-1)}$ ($n = 2, 3, \dots, 5$).

2. Для автогенератора на двухзазорном резонаторе на 0-виде колебаний с разными амплитудами напряжений на зазорах оптимальный по КПД режим достигается при определённых значениях амплитуды напряжения на первом зазоре ξ_n и его длины D_n , которые с погрешностью

не более 5 % определяются по аппроксимационным соотношениям:
 $D_n = D_0 + 1.5 - 0.6^n$, $\xi_n = \xi_{n-1} - 0.1$ ($n = 1, 2, \dots, 5$).

3. С увеличением номера зоны КПД генератора на двухзазорном резонаторе существенно увеличивается (с 14 % на нулевой зоне до 65 % на пятой для противофазного вида колебаний и с 40 % до 66 % для синфазного вида), в основном за счет уменьшения потерь на скоростную модуляцию в первом зазоре из-за требуемого увеличения его длины и соответственно уменьшения активной составляющей электронной проводимости.

4. В многолучевых автогенераторах *сантиметрового* диапазона на двухзазорных резонаторах нелинейность распределений высокочастотного электрического поля по продольной и поперечной координатам зазоров создает неодинаковые условия оптимального взаимодействия лучей разных рядов с полями зазоров, что приводит к заметному уменьшению электронного КПД по сравнению с однолучевыми конструкциями (с 40 % до 34 % для нулевой зоны синфазного вида колебаний и с 51 % до 42 % для первой зоны противофазного вида колебаний).

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 11 научно-технических конференциях: 15-й международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”, Севастополь, Украина, 12-16 сентября 2005 г.; международных научно-технических конференциях “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП”, г. Саратов (АПЭП-2006, АПЭП-2007, АПЭП-2008); VIII всероссийской научной конференции “Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления” (г. Таганрог, 2006); LXIII научной сессии НТО РЭС имени А.С. Попова, посвященной Дню радио (г. Москва, 2008); научно-технической конференции “Электроника и вакуумная техника: ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА. ТЕХНОЛОГИЯ. МАТЕРИАЛЫ” (г. Саратов, 2009); 52-й, 53-й студенческой научно-технической конференции (РГРТУ, г. Рязань, 2005, 2006); 40-й и 41-й научно-технической конференции (РГРТУ, г. Рязань, 2008, 2010).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, из них 8 статей (в том числе в рецензируемых журналах и изданиях, определенных ВАК Минобрнауки РФ, – 2 статьи), 3 тезиса докладов в материалах российских научно-технических конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений, содержит 165 страниц, включая 12 таблиц, 72 рисунка, 74 формулы, список литературы состоит из 87 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы: обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, изложены основные решаемые задачи, показана научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой обзор литературы по применению двухззорных резонаторов в приборах клистронного типа. Литературные источники показали, что проведено подробное исследование вопросов, связанных с применением двухззорных резонаторов в качестве входных, промежуточных и выходных резонаторов многорезонаторных пролетных клистронов. Теоретические исследования, проведенные в 40-50-х годах прошлого века, показали возможность получения в генераторах на двухззорных резонаторах КПД около 50 %. Расчеты с использованием современного программного обеспечения, проведенные на кафедре ЭП РГРТУ по инициативе проф. В.П. Панова, подтвердили возможность получения таких значений КПД. В экспериментальных макетах автогенераторов на двухззорных резонаторах на 0-виде колебаний, выполненных М. Чодоровым и С. Фаном (1953 г.), а также Р.Б. Нельсоном (1962 г.), получены значения КПД не более 25 %, что связано с отсутствием в то время численных математических моделей и методов оптимизации на их основе. Сообщений о практической реализации автогенераторов на π -виде колебаний нет. В целом, обзор публикаций показал, что проведение подробных исследований процессов взаимодействия электронного потока с СВЧ полем в автогенераторах на двухззорных резонаторах в нелинейном режиме и оптимизация их параметров на максимум КПД остаются **актуальной** задачей.

По результатам проведенного анализа сформулированы цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке методики расчета двухззорных генераторов с использованием пакета прикладных программ разного уровня. В ней дано описание математических моделей, содержания и возможностей программ.

Сначала для выяснения основных закономерностей и особенностей процесса автогенерации колебаний в автогенераторе на двухзазорном резонаторе использована нелинейная численно-аналитическая модель, основанная на одномерном приближении без учета пространственного заряда (программа **EXPRA**). Электронный КПД по программе **EXPRA** для каждого зазора определялся по соотношению:

$$\eta_e = \frac{P_e}{P_0} = \frac{1}{2} \xi I_{1a}^{nop}, \quad (1)$$

где I_{1a}^{nop} – нормированная амплитуда активной составляющей первой гармоники тока, наведенного в цепи соответствующего зазора, $\xi = U_m / U_0$ – амплитуда нормированного напряжения на зазорах, U_m – амплитуда переменного напряжения, U_0 – ускоряющее напряжение. Общий электронный КПД автогенератора определялся суммированием КПД первого и второго зазоров, то есть $\eta_e = \eta_{e1} + \eta_{e2}$. С использованием модели потока из крупных частиц и уравнения Рамо для наведенного тока было получено соотношение:

$$I_{1a}^{nop} = \frac{I_{1a}}{I_0} = \frac{4\pi}{MND} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_n} V_n(\theta_m) \sin(\theta_m), \quad (2)$$

где n – номер крупной частицы, N – число крупных частиц на периоде, $\theta_m = m\Delta\theta$, $\Delta\theta = 2\pi / M$ – шаг по времени, m – номер шага по времени, M_n – число дискретных шагов движения частицы n в зазоре длиной D , M – число разбиения временного периода на интервалы $\Delta\theta$, I_0 – ток луча. Для определения нормированной скорости $V_n(\theta_m)$ и числа шагов M_n был использован алгоритм “шаг за шагом” решения уравнений движения.

Результаты оптимизации, полученные по программе **EXPRA**, использовались в качестве исходных для уточнения и дальнейшей оптимизации по более сложным, но менее быстродействующим программам, основанным на математических моделях, учитывающих многие факторы и особенности конструкций реальных приборов. В используемом пакете такими программами являются программа анализа двумерных динамических процессов в приборах клистронного типа **KLIS-2**, основанная на дискретной модели потока из деформирующихся элементов, и программа **UPR**, предназначенная для расчета и проектирования электродинамических систем.

Оптимизация параметров автогенераторов проводилась методом покоординатного спуска при использовании электронного КПД η_e в качестве функции цели.

Третья глава посвящена исследованию процессов взаимодействия электронов с полями в однолучевых двухзачорных автогенераторах на π - и 0-виде колебаний на шести зонах генерации, а также оптимизации геометрических размеров и режимов автогенератора на двухзачорном резонаторе с целью определения максимальных значений КПД.

Аналитически были определены амплитудные и фазовые условия самовозбуждения генераторов. Получены соотношения для пускового тока и минимального первеанса, начиная с которых возможно самовозбуждение. При проведении формальной оптимизации физическая картина процессов скрыта. Поэтому часть расчетов была представлена в виде семейства кривых с экстремальными точками. В качестве примера на рисунке 1 эти зависимости при оптимизации по L и D_1 приведены для π -вида. Затем при оптимальных на данном цикле L и D_1 были оптимизированы D_2 и ξ . В результате рассматриваемого цикла оптимизации получен электронный КПД $\eta_e = 49.5\%$. Следующие циклы оптимизации привели к небольшому увеличению КПД до 51.3% .

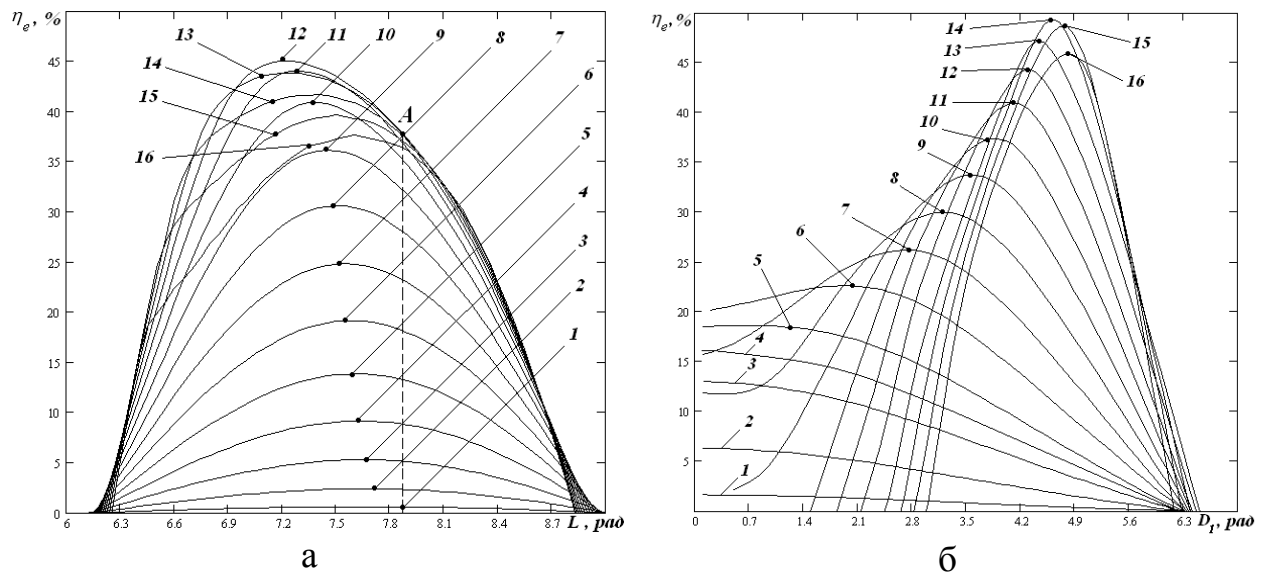


Рисунок 1 – Процесс оптимизации по L (а) и D_1 (б). Кривым 1-16 соответствуют $\xi = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.6$ при $D_2 = \pi / 2 \text{ рад}$; а – $D_1 = 4.2 \text{ рад}$; б – L и ξ соответствуют точкам экстремумов кривых на рис.1, а

Аналогичные расчеты были проделаны для шести зон генерации π - и 0-вида колебаний. Результаты показаны на рисунке 2 и в таблицах 1, 2.

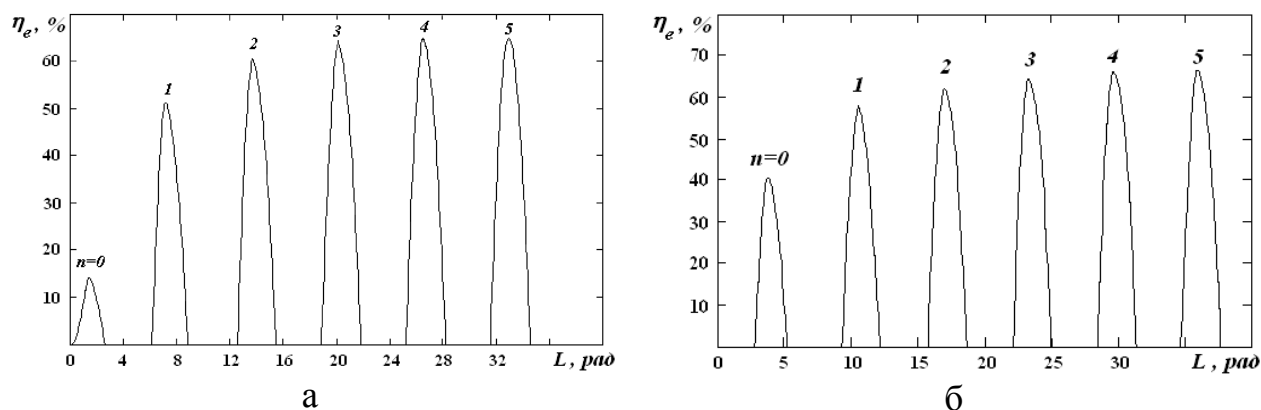


Рисунок 2 – Зависимость электронного КПД η_e от L : а – π -вид, б – 0-вид

Таблица 1 – Результаты оптимизации параметров для π -вида колебаний

Зоны генерации	η_{e1} , %	η_{e2} , %	η_e , %	D_1 , рад	L , рад	D_2 , рад	ξ
0	-0.1	14.2	14.1	0.46	1.35	1	0.65
1	-13.9	65.2	51.3	4.71	7.15	1.48	1.4
2	-7.6	68.1	60.5	5.32	13.6	1.33	1.33
3	-4.9	69.5	64.6	5.58	20.1	1.17	1.26
4	-3.6	68.4	64.8	5.71	26.45	1.12	1.21
5	-2.9	67.8	64.9	5.73	32.9	1	1.1

Таблица 2 – Результаты оптимизации параметров для 0-вида колебаний

Зоны генерации	η_{e1} , %	η_{e2} , %	η_e , %	D_1 , рад	L , рад	D_2 , рад	ξ_1	ξ_2
0	-21.7	61.7	40.0	4.25	3.8	1.52	1.6	1.5
1	-11.6	69.5	57.8	5.24	10.5	1.42	1.4	1.4
2	-5.7	67.8	62.1	5.40	16.8	1.20	1.3	1.3
3	-4.3	68.7	64.4	5.60	23.2	1.15	1.2	1.2
4	-3.1	69.0	65.9	5.70	29.6	1.10	1.1	1.2
5	-2.5	68.6	66.1	5.78	36.0	1.10	1.0	1.2

На π -виде небольшое значение $\eta_e = 14.1$ % для нулевой зоны связано с ограничением размеров трубы дрейфа L_T из-за смыкания зазоров и неэффективного группирования электронов. КПД преобразования энергии во втором зазоре η_{e2} в остальных зонах ($n=1...5$) составляет 65...70 % (таблица 1). Для нулевого вида в зонах с 0 по 5 η_{e2} составляет 62...70 % (таблица 2). Общий КПД оказывается меньше на величину потерь энергии в первом зазоре из-за скоростной модуляции электронов (отрицательные значения η_{e1} в таблицах 1, 2), которые уменьшаются с

увеличением номера зоны генерации. В целом суммарный электронный КПД автогенератора на двухзазорном резонаторе оказался максимальным на пятой зоне и составил для π -вида 65 % и для 0-вида 66 %.

В целом проведенные исследования показали следующее. Для π -вида колебаний, когда амплитуды напряжений на зазорах одинаковые, оптимальный по КПД режим, для которого максимум первой гармоники тока приходится на область второго зазора, достигается изменением длины первого зазора D_1 , которая с увеличением номера зоны n с погрешностью не более 5 % определяется по аппроксимационному соотношению $D_n = D_1 + 1.05 - 0.4^{(n-1)}$. Для 0-вида колебаний, когда амплитуды напряжений на зазорах разные, оптимальный по КПД режим достигается совместным изменением амплитуды напряжения на первом зазоре и его длины, которые с погрешностью не более 5 % определяются аппроксимационными соотношениями: $D_n = D_0 + 1.5 - 0.6^n$, $\xi_n = \xi_{n-1} - 0.1$.

Для практического применения автогенератор на двухзазорном резонаторе на π -виде колебания рекомендовано использовать первую зону с электронным КПД примерно 50 % и вторую зону с КПД 60 %, а на нулевом виде – нулевую зону с КПД 40 % и первую зону с КПД 57.7 %. Для зон с более высоким номером будет велика длина трубы дрейфа и, возможно, более предпочтительным будет размещение на этой длине дополнительных зазоров или системы с распределенным взаимодействием.

Сравнение оптимизированных параметров генератора с сеточными и бессеточными зазорами показало, что размеры, полученные для случая сеточных зазоров, могут быть с погрешностью не более 5 % пересчитаны на размеры бессеточных зазоров при условии равенства расстояний L между серединами зазоров и равенства коэффициентов взаимодействия каждого сеточного зазора и усредненных по радиусу потока коэффициентов взаимодействия соответствующих бессеточных зазоров.

Исследование с использованием программы **KLIS-2** влияния пространственного заряда на КПД показало, что в интервале изменения первеанса потока P от 0 до $0.75 \cdot 10^{-6} A/B^{3/2}$ пространственный заряд практически не влияет на КПД, так как процессы взаимодействия происходят при амплитудах переменных напряжений, сравнимых с ускоряющим напряжением. При $P=1 \cdot 10^{-6} A/B^{3/2}$ максимальное уменьшение КПД не превышает 2 %.

Для определения $\eta_{рез}$, обеспечивающего максимальные значения электронного КПД η_e , было получено соотношение:

$$\eta_{рез} = 1 - \frac{1}{2} \frac{\xi^2 U_0}{\eta_e I_0} \frac{1}{\rho Q_0} = 1 - \frac{1}{2} \frac{I^2}{\eta_e P U_0^{1/2}} \frac{1}{\rho Q_0},$$

которое включает параметры режима генерации ξ и η_e , параметры электронного потока I_0 и U_0 или P и U_0 , параметры резонатора – характеристическое сопротивление ρ и собственную добротность Q_0 .

Достоверность математического моделирования и методики оптимизации была проверена путем детального сопоставления результатов расчетов с результатами экспериментальных исследований автогенератора на двухззорном резонаторе на 0-виде колебаний (a floating-drift-tube klystron), выполненных М. Чодоровым и С. Фаном. Сопоставление показало, что методика, основанная на последовательном использовании программ разного уровня, дает результаты, адекватные экспериментальным, с расхождением не более 2.5 %.

В четвертой главе с использованием полученных результатов и рекомендаций было проведено проектирование многолучевых генераторов на двухззорных резонаторах и сопоставление результатов расчета с экспериментом. Исследование особенностей процессов взаимодействия в автогенераторах многолучевой конструкции проводилось применительно к конструкции 30-лучевого двухсекционного клистрона со следующими параметрами: $U_0 = 24$ кВ, $f = 5.5$ ГГц ($\lambda = 5.45$ см), первеанс одного луча – $0.3 \cdot 10^{-6} A/B^{3/2}$, ток одного луча – 1.12 А, мощность источника питания на одну секцию – 403 кВт, число лучей внутреннего ряда – 5, внешнего ряда – 10. Так как секции идентичны, то расчеты проводились для одной секции из 15 лучей (рисунок 3).

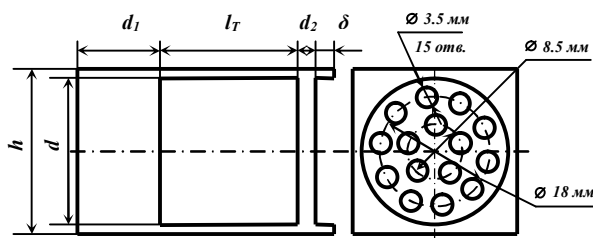


Рисунок 3 – Двухззорный резонатор многолучевой конструкции

Таблица 3 – Последовательность оптимизации параметров многолучевого генератора

Вар.	D_1 , рад	L , рад	D_2 , рад	ξ_1	ξ_2	η_e , %
1	4.25	0.96	1.52	1.58	1.47	40
2	4.25	0.96	1.52	1.58	1.47	31
3	4.02	1.1	0.96	1.65	1.69	39
4	4.02	1.8	0.96	1.65	1.69	34

С использованием пакета прикладных программ **EXTRA**, **KLIS** и **UPR** последовательно было исследовано влияние различных неоднородностей полей многолучевой двухрядной конструкции сантиметрового диапазона на оптимизированные параметры и КПД

автогенератора. Результаты для нулевой зоны нулевого вида приведены в таблице 3. В качестве исходных данных были взяты результаты оптимизации, полученные в главе 3 (вариант 1 в таблице 3). Учет неоднородности поля бессеточного зазора при тех же размерах и режиме привел к уменьшению электронного КПД η_e с 40 до 31% (вариант 2). Изменение длин зазоров D_1 и D_2 в соответствии с условием эквивалентности сеточных и бессеточных зазоров и оптимизация по расстоянию между серединами зазоров L привели к значению $\eta_e = 39\%$ (вариант 3).

Особенностью многорядной конструкции в *сантиметровом* диапазоне является заметное изменение поля по поперечному размеру зазоров, примерно как в радиальной линии. Так, по отношению к напряжению на оси резонатора амплитуда напряжения для лучей внутреннего ряда уменьшается в 1.1 раза, а для лучей внешнего ряда – в 1.3 раза. Условия получения максимального КПД для лучей разных рядов оказываются разные (рисунок 4). За счет этого фактора в оптимизированном варианте по сравнению с вариантом 3 произошло уменьшение на 3 % КПД, усредненного по всем лучам. Другой особенностью автогенератора многорядной конструкции является то, что из-за замыкания силовых линий электрического поля на внешнюю трубу резонатора распределение напряженности электрического поля вдоль продольной координаты является нелинейным и эта нелинейность разная для лучей разных рядов. Для лучей внутреннего ряда напряженность поля у конца первого зазора в 1.4 раза больше, чем у его начала, а для лучей внешнего ряда напряженности в начале и в конце зазора различаются в 3.2 раза (рисунок 5).

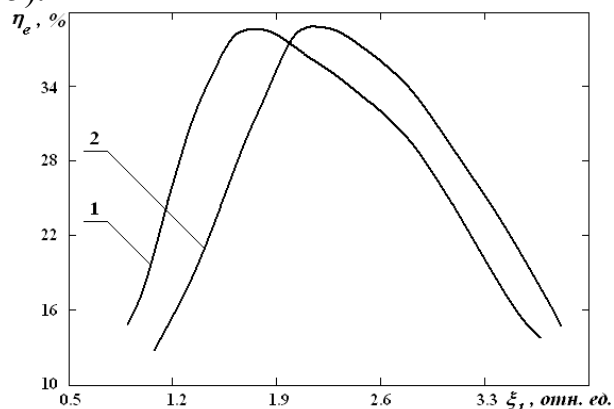


Рисунок 4 – Зависимость электронного КПД от нормированной амплитуды напряжения первого зазора: 1 – для лучей внутреннего ряда, 2 – для лучей внешнего ряда

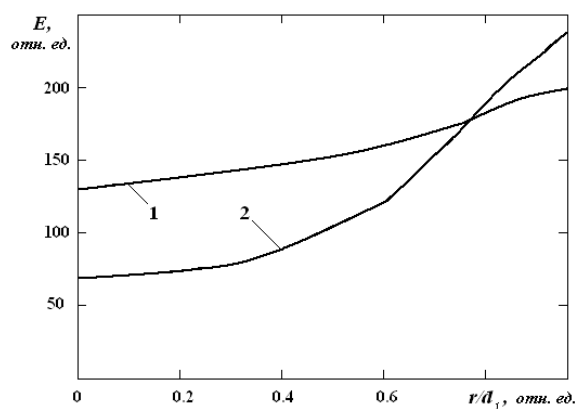


Рисунок 5 – Распределение электрического поля вдоль первого зазора: 1 – по оси лучей внутреннего ряда; 2 – по оси лучей внешнего ряда

Данное явление в оптимизированном варианте 4 привело к уменьшению КПД на 2 % и увеличению расстояния L в 1.6 раза. В целом нелинейное распределение переменного электрического поля по поперечной и продольной координатам зазоров привело к уменьшению КПД на 6 % – с 40 % (вариант 1) до 34 % (вариант 4). Во всех случаях с использованием программы **UPR** требуемое соотношение напряжений на зазорах достигалось изменением величины выступа δ за вторым зазором, а резонансная частота поддерживалась изменением размера h (рисунок 3).

С использованием разработанной методики было проведено проектирование области взаимодействия трех вариантов двухзазорных многолучевых генераторов с КПД по мощности в нагрузку около 30 % и выходной мощностью 120 *кВт* на одну секцию: два варианта для нулевой зоны нулевого вида с узким и длинным первым зазором и один вариант для первой зоны π -вида колебаний. Результаты переданы в ФГУП «НПП «Исток» для изготовления экспериментальных образцов автогенераторов.

Сопоставление результатов расчетов и эксперимента было проведено для автогенератора на базе 4-лучевого телевизионного клистрода, изготовленного в ОАО «НПП «Контакт» (г.Саратов). В клистроде использован двухзазорный выходной резонатор. Расчеты показали возможность автогенерации в выходном резонаторе на нулевой зоне нулевого вида колебаний при напряжении 9 *кВ* на частоте 530 *МГц* с КПД по мощности в нагрузку 39.7 % при $\eta_e = 44.6$ % и требуемом КПД контура $\eta_k = 89$ %. В эксперименте автогенерация была получена при напряжении 9.1 *кВ* с выходной мощностью 3.7 *кВт* при КПД 44 %. Расхождение расчетных и экспериментальных значений по ускоряющему напряжению составило 1 %. Расчетные и экспериментальные значения КПД по мощности в нагрузку отличались на 5 %.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. С использованием пакета прикладных программ исследованы процессы в автогенераторах на двухзазорных резонаторах. Установлены основные закономерности преобразования энергии в автогенераторах и оптимизированы внутренние параметры для получения максимального КПД.

2. Показано, что при переходе от линейного режима малых амплитуд к нелинейным режимам для получения экстремальных значений

КПД необходимо изменять режим и размеры элементов двухзазорных резонаторов таким образом, чтобы максимум первой гармоники конвекционного тока приходился на область второго зазора. При этом для центров зон колебаний

– на противофазном π -виде колебаний, для которого равны амплитуды напряжений на зазорах, а протекающие через них токи разные, с увеличением номера зоны необходимо увеличивать длину первого зазора в соответствии с аппроксимационным соотношением $D_n = D_1 + 1.05 - 0.4^{n-1}$, где $n = 1, 2, 3, \dots$ – номер зоны генерации;

– на синфазном нулевом виде колебаний, для которого равны токи, протекающие через зазоры, а амплитуды напряжений на них могут быть разные, с увеличением номера зоны необходимо уменьшать амплитуду напряжения на первом зазоре по сравнению со вторым, а его длину увеличивать в соответствии с аппроксимационным соотношением $D_n = D_0 + 1.5 - 0.6^n$, где $n = 2, 3, 4, \dots$.

3. Установлено, что максимальные значения электронного КПД в центре зон растут с увеличением номера зоны: для π -вида колебаний с 14 % на нулевой зоне до 65 % на пятой, для нулевого вида – с 40 % на нулевой зоне до 66 % на пятой, в основном за счет уменьшения потерь на скоростную модуляцию в первом зазоре.

4. Рекомендовано для автогенераторов на двухзазорных резонаторах использовать: на π -виде колебаний первую зону с электронным КПД 50 % и вторую зону с КПД 60 %, а на нулевом виде – нулевую зону с КПД 40 % и первую зону с КПД 57.7 %.

5. Установлена эквивалентность по КПД генераторов на двухзазорных резонаторах с сеточными и бессеточными зазорами на основе равенства коэффициентов взаимодействия каждого сеточного зазора и усредненных по радиусу потока коэффициентов взаимодействия соответствующих бессеточных зазоров.

6. Выявлено, что пространственный заряд в пределах практически используемых значений первеанса менее $0.75 \cdot 10^{-6} A/B^{3/2}$ мало влияет на КПД автогенераторов вследствие больших значений амплитуд переменных напряжений на зазорах, сравнимых с ускоряющим напряжением.

7. Установлено, что в сантиметровом диапазоне в многолучевой двухрядной конструкции генератора в отличие от однорядной не совпадают условия реализации максимального КПД в рядах лучей, расположенных на разном расстоянии от оси системы, что приводит к

уменьшению общего КПД генератора: для 1-й зоны π -вида с 51 % до 42 %, для нулевой зоны 0-вида с 40 % до 34 % .

8. Установлено, что в многорядной многолучевой конструкции с длинным первым зазором концентрация электрического поля у торца зазора сдвигает центр эквивалентного зазора в сторону торца, что приводит к увеличению оптимальной длины пролетной трубы в 1.2 раза по сравнению со случаем однородного поля.

9. Разработана методика проектирования многолучевых многорядных автогенераторов, основанная на использовании пакета прикладных программ разного уровня для расчета электронных процессов и проектирования электродинамических систем.

10. Выполнено проектирование трех вариантов 30-лучевых двухсекционных автогенераторов на двухзазорных резонаторах на выходную мощность 120 *кВт* на одну секцию с КПД 30 % на длине волны 5.45 *см* с ускоряющим напряжением 24 *кВ* и общим током 33.6 *А*. Результаты проектирования переданы в ФГУП «НПП «Исток» для изготовления экспериментальных образцов автогенераторов.

11. Проведено сопоставление расчетных данных с результатами эксперимента, выполненного на базе многолучевого клистрода с двухзазорным выходным резонатором, настроенным на режим автогенерации. Экспериментально подтверждена показанная в расчетах возможность получения на нулевой зоне синфазного вида колебаний КПД около 40 %.

В целом результаты проведенных исследований показали, что на двухзазорных резонаторах могут быть созданы автогенераторы СВЧ средней и большой мощности с КПД 30 – 50 %.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Федяев В.К., Пашков А.А., Горлин О.А. Исследование параметров одиночных и двойных СВЧ зазоров в нелинейном режиме // Материалы 15-й международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”. 12-16 сентября 2005 г. Т.1. Севастополь, 2005. С. 201-202.

2. Федяев В.К., Горлин О.А., Пашков А.А. Исследование электронного КПД автогенератора на двухзазорном резонаторе с зазорами разной длины // Материалы международной конференции “Актуальные

проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006”, 19-21 сентября 2006 г. Саратов: СГТУ, 2006. С. 36-42.

3. Горлин О.А. Исследование КПД двухзазорных резонаторов // VIII Всероссийская научная конференция. Таганрог, 2006. С.263-264.

4. Горлин О.А. Влияние пространственного заряда и неоднородности поля зазоров на параметры двухзазорного резонатора // 53-я студенческая научно-техническая конференция “Приборы и устройства СВЧ”, 19 апреля 2006 г. Рязань, 2006. С.21-22.

5. Горлин О.А., Гринь Г.Н. Исследование электронного КПД автогенератора на 0-виде колебаний // Электроника: межвуз. сб. науч. тр. Рязань, 2007. С.35-39.

6. Федяев В.К., Горлин О.А., Юркин В.И. Особенности фокусировки потока в автогенераторе СВЧ на двухзазорном резонаторе // Восьмой всероссийский семинар “Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики”. Москва, 2007. С.62-63.

7. Федяев В.К., Горлин О.А. Автогенератор на двухзазорном резонаторе // Материалы международной конференции “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2007”. Саратов: СГТУ, 2007. С.74-75.

8. Горлин О.А. Исследование электронного КПД двухзазорного автогенератора на первой зоне синфазного вида колебаний // **Вестник РГРТУ**. Вып. 23. Рязань, 2008. С.125-128.

9. Федяев В.К., Горлин О.А. Коэффициент полезного действия питрона – двухзазорного автогенератора с противофазным видом колебаний // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Москва, 2008. С.338-340.

10. Федяев В.К., Горлин О.А. Численное моделирование автогенератора на двухзазорном резонаторе // Материалы международной конференции “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2008”, Саратов: СГТУ, 2008. С.49-55.

11. Горлин О.А., Мишин В.Ю., Федяев В.К., Шишков А.А. Проектирование многолучевого автогенератора СВЧ на двухзазорном резонаторе// **Вестник РГРТУ**. Вып. 31. Рязань, 2010. С.69-72.

Горлин Олег Анатольевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
ОДНО- И МНОГОЛУЧЕВЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ
НА ДВУХАЗОРНЫХ РЕЗОНАТОРАХ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 10.07.10. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ.

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