

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.372.8

Навроцкий
Анатолий Александрович

**ТЕОРИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЛЬВ-О С НЕРЕГУЛЯРНЫМИ
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Минск 2009

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: Синицын Анатолий Константинович,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры вычислительных методов
и программирования учреждения образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: Рудницкий Антон Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, зав. кафедрой радиофизики
Белорусского государственного университета

Дробот Сергей Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
зав. кафедрой электроники учреждения
образования «Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация: Научно-исследовательское учреждение
«Институт прикладных физических проблем
имени А. Н. Севченко» Белорусского
государственного университета

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Лампа бегущей волны (ЛБВ) составляет основу современных систем связи, радиолокации, радиопротиводействия и, ввиду уникально большой полосы усиления является наиболее востребованным прибором вакуумной СВЧ электроники. В связи с тем, что электронный КПД используемых ЛБВ ограничивается 20-30%, проблема установления физических эффектов и закономерностей, способствующих повышению эффективности взаимодействия потока электронов с усиливаемой электромагнитной волной в таких лампах достаточно актуальна. Спиральные ЛБВ с высоким коэффициентом усиления для предотвращения самогенерации имеют поглотитель и по существу являются двухсекционными: первая секция – до поглотителя, вторая – после. Имеющиеся эффективные методы расчета односекционных ЛБВ неприменимы для таких ламп из-за того, что не учитывают особенностей, связанных с падением амплитуды сигнала на поглотителе. Поэтому актуальным является разработка специфических для расчета двухсекционных спиральных ламп методов и нахождение закономерностей изменения физических характеристик в каждой секции ЗС вдоль области взаимодействия, при которых обеспечивается существенное повышение электронного КПД. Актуальным также является установление физических закономерностей обеспечения распределения по скоростям электронов на выходе области взаимодействия ЛБВ приводящем к повышению технического КПД (учитывающего неиспользованную мощность, возвращаемую в систему питания) при одноступенчатой рекуперации.

Большое распространение в настоящее время нашли ЛБВ на цепочке связанных регулярных резонаторов (ЛБВ на ЦСР), позволяющие использовать пучки с напряжением 10 – 80 кВ. Для таких ламп актуальным является изучение физических закономерностей дискретного взаимодействия электронного потока и усиливаемой электромагнитной волны в зазорах неидентичных резонаторов и предложение на их использовании способов повышения электронного КПД.

Невозможность использования пространственно развитого пучка электронов принципиально ограничивает мощность спиральных и ЛБВ на ЦСР. Поэтому актуальным является изучение условий эффективного усиления и генерации в ЛБВ-О на пространственно развитом цилиндрическом пучке с замедляющей системой в виде отрезка коаксиального периодического гофрированного волновода.

Обнаружение и изучение физических эффектов и закономерностей распространения электромагнитных волн в замедляющих системах ЛБВ-О требует получения адекватных математических моделей, вычислительных методов и разработка на их основе пакетов прикладных программ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертация выполнена в рамках одного из научных направлений БГУИР – «Методы моделирования и оптимизации в радиоэлектронных системах и устройствах». Результаты нашли свое отражение в следующих государственных НИР, выполнявшихся на кафедрах «ВМиП» и «АиУСВЧ» в период с 1994 по 2009 г: ГБЦ № 94-3015 «Методы математического моделирования и оптимизации нелинейных процессов взаимодействия мощных электронных потоков с электромагнитными полями»; ГБЦ № 96-3118 «Сложная нелинейная динамика автогенераторов и усилителей СВЧ и эффекты самоорганизации»; ГБЦ № 96-3120 «Нелинейное возбуждение электромагнитных волн мощными электронными потоками»; ГБЦ № 96-3048 «Возбуждение электромагнитных волн мощными электронными потоками, методы и программы моделирования и оптимизации»; ГБЦ № 96-3061 «Исследовать оптимальные режимы генератора СВЧ на основе асинхронного взаимодействия»; ГБЦ № 97-3079 «Разработать математические модели, программное обеспечение и структуры активных сред на основе наноразмерных автоэмиссионных управляемых катодов для микровакуумных усилителей и генераторов»; ГБЦ № 01-3082 «Комбинированные процессы излучения релятивистских электронных потоков в многомодовых нерегулярных электродинамических структурах»; ГБ № 06-2035 «Разработка моделей, методов и пакетов программ поддержки принятия решений в проектировании и управлении».

Цель и задачи исследования

Целью работы является создание адекватных математических моделей и эффективных методов расчета ЛБВ-О с нерегулярными замедляющими системами трех типов (спиральной, на ЦСР, на коаксиальном гофре), изучение на их основе физических эффектов и установление закономерностей взаимодействия электронного потока с возбуждаемой в таких лампах электромагнитной волной при оптимальных по КПД режимах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

– формулировка строгих уравнений возбуждения спирального волновода в экране с переменным по длине углом навивки спирали и разработка адекватной математической модели процесса взаимодействия в ЛБВ-О с нерегулярной замедляющей системой на основе спирального волновода;

– разработка метода расчета и установление основных закономерностей дисперсии замедляющей системы в виде спирали, закрепленной в экране диэлектрическими стержнями различного поперечного сечения, а также метода

поиска оптимального закона изменения характеристик замедляющей системы вдоль выходной секции ЛБВ-О;

– выявление физических закономерностей взаимодействия в двухсекционных ЛБВ-О с нерегулярной спиральной ЗС и одноступенчатым рекуператором, проявляющихся при оптимальных по КПД режимах работы.

– развитие метода синхронного электрона для поиска оптимального по КПД закона изменения параметров резонаторов вдоль ЛБВ с нерегулярной ЦСР и выявить основные физические закономерности в таких приборах при предельно достижимых КПД;

– создание математической модели ЛБВ-О на квази- T волне коаксиального гофрированного волновода с использованием метода отображения нерегулярного волновода на регулярный, установить закономерности и предельные по КПД режимы работы таких приборов.

Объектом исследования является процесс усиления сигнала в нерегулярных ЛБВ-О с различными типами ЗС. Предмет исследования в соответствии с целью и задачами работы включает в себя различные нелинейные аспекты взаимодействия: возбуждаемые электромагнитные поля, усиление сигнала, эффективность, фазовое группирование электронов, передачу энергии электронов электромагнитной волне, рекуперацию.

Положения, выносимые на защиту

1. Уравнения возбуждения спирального волновода в экране с переменным вдоль области взаимодействия углом навивки спирали, впервые полученные с использованием метода преобразования координат и позволяющие построить адекватную математическую модель нерегулярной ЛБВ-О, в которой снимается проблема синтеза параметров спиральной ЗС.

2. Метод расчета дисперсии спиральной ЗС с диэлектрическими опорными стержнями произвольной формы поперечного сечения, который сводит решение к задаче расчета полей в пространстве между спиралью и экраном, которое заполнено материалом, имеющим неоднородное радиальное распределение диэлектрической проницаемости. Указанный метод позволил установить закономерности изменения фазовой скорости и сопротивления связи спиральной ЗС при изменении диэлектрической проницаемости или формы опор.

3. Метод авторегулировки замедления для нахождения величины изменения фазовой скорости вдоль выходной секции спиральной ЛБВ, основанный на установленной физической закономерности изменения амплитуды сигнала и замедления вдоль ЗС. Впервые установленные параметры и закономерности изменения шага спирали ЗС во входной и выходной секциях ЛБВ при которых создаются оптимальные условия группирования и после-

дующего отбора энергии электронов, что позволило получить электронный КПД=72% и технический КПД=86% с простейшей одноступенчатой рекуперацией.

4. Математическую модель и модификацию метода синхронного электрона для ЛБВ с нерегулярной ЦСР на основе согласованной в холодном режиме эквивалентной схемы из последовательности четырехполюсников, между которыми подключены активные элементы. Впервые полученные параметры цепочек неидентичных связанных резонаторов, при которых за счет более длительного сопровождения формируемого сгустка КПД составляет более 70%. Это является обоснованием целесообразности создания ЛБВ с нерегулярными ЦСР.

5. Математическую модель ЛБВ-О на квази- T волне коаксиального гофрированного волновода с использованием метода отображения нерегулярного волновода на регулярный и метод расчета дисперсионных характеристик ЗС этой лампы. Найденные с использованием полученной модели условия, при которых КПД составляет 70%, а для генератора отражательного типа – 50%. Выявленное несоответствие распределения квази- T волн частному решению Флоке при обеспечении условий согласования на концах волновода.

Личный вклад соискателя

Руководителем Сеницыным А. К. определена цель и постановка задач. Совместно с ним проводилось обсуждение способов и методов решения поставленных задач, оценка полученных результатов. Совместно с Кураевым А. А. обсуждалось общее направление исследований, оценка полученных результатов. Совместно с Аксенчиком А. А. обсуждалась методика проведения исследований ЛБВ-О на ЦСР. С Попковой Т. Л. и Парамоновым Б. М. проводилось обсуждение полученных результатов решения задач. Диссертанту принадлежит доминирующая роль в разработке математических моделей, решении конкретных задач на их основе и анализе результатов, выводах и рекомендациях.

Апробация результатов диссертации

Материалы диссертации докладывались на 10-й, 11-й, 13-й и 19-й международных крымских конференциях "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо'2000, КрыМиКо'2001, КрыМиКо'2003, КрыМиКо'2009. Украина, Севастополь; на 1 и 4 IEEE International Vacuum Electronics Conference Monterey, USA, 2000, Seoul, Korea, 2003.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, среди которых 8 статей в научных журналах на 41 странице (5 авт. л.), 9 ма-

териалов конференций, 2 тезиса докладов, 1 глава в книге. Общий объем опубликованных материалов составляет 88 страниц (10,5 авт. л.).

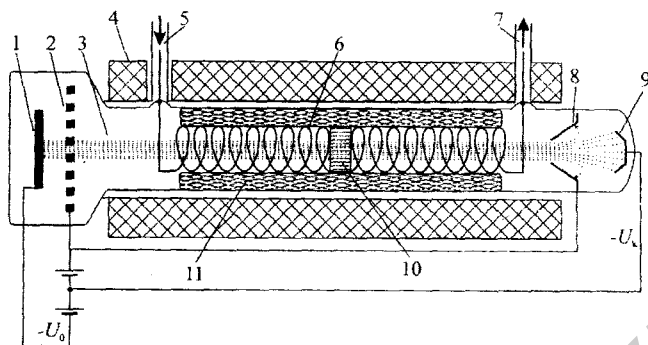
Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников. В первой главе описаны механизмы повышения эффективности и предлагаемые математические модели спиральной ЛБВ-О с нерегулярной ЗС. Во второй главе описаны полученные предельные характеристики спиральных ЛБВ-О. В третьей главе излагаются математическая модель ЛБВ на ЦСР и полученные с использованием этой модели характеристики. В четвертой главе рассматривается ЛБВ-О на коаксиальном гофрированном волноводе; ее математическая модель и полученные оптимальные варианты усилителей и генераторов. Общий объем работы составляет 119 страниц машинописного текста, в том числе 62 рисунка на 45 страницах, 1 таблица на 1 странице, список использованных источников, включающий 77 наименований на 5 страницах, 2 приложения на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе описан механизм усиления электромагнитных волн в спиральной ЛБВ-О, исследованы способы повышения эффективности таких ламп, сформулированы строгие уравнения возбуждения спирального волновода с переменным углом навивки и рассмотрена математическая модель двухсекционной ЛБВ со спиралью, закрепленной в экране диэлектрическими опорами с одноступенчатым рекуператором (рисунок 1) [2-А, 7-А, 8-А, 19-А].

Наиболее действенным способом повышения электронного КПД спиральных ЛБВ является оптимизация распределения «холодной» (без пучка электронов) фазовой скорости вдоль области взаимодействия электронного пучка с усиливаемой электромагнитной волной. В ЛБВ с коэффициентом усиления больше ≈ 14 Дб необходимо использовать поглотитель, поэтому такие лампы по сути являются двухсекционными. Уровень технического КПД в ЛБВ может быть повышен за счет использования простейшей одноступенчатой рекуперации отработанных электронов совместно с оптимизацией распределения фазовой скорости в каждой секции. Для обеспечения такой оптимизации необходимо использование адекватных методов математического моделирования процесса усиления и учет выявленных закономерностей замедления в ЛБВ с нерегулярной спиральной ЗС.



1 – катод, 2 – ускоряющий электрод, 3 – электронный пучок, 4 – фокусирующая магнитная система, 5 – вход СВЧ сигнала, 6 – спиральная ЗС, 7 – вывод усиленного СВЧ сигнала, 8 – электрод рекуператора, 9 – коллектор, 10 – поглотитель, 11 – диэлектрические опоры.

Рисунок 1 – Схема усилительной ЛБВ-О с одноступенчатым рекуператором

В диссертации впервые развита строгая теория возбуждения волновода с постоянным радиусом R_0 спирали и произвольно меняющейся вдоль оси навивкой, уравнение которой в системе координат (r, φ, z) имеет вид

$$\varphi = \int_0^z f(z) dz. \text{ Угол навивки } \psi_s(z) \text{ связан с функцией } f(z) \text{ уравнением}$$

$\text{ctg} \psi_s = R_0 f(z)$. На основе операции отображения в пространство, где спираль оказывается регулярной в системе координат (ρ, ϕ, ζ)

$$\rho = r; \phi = \varphi / h(z); \zeta = z, \text{ (здесь } h(z) = \frac{1}{z} \int_0^z f(z) dz \text{) и с применением проекци-$$

онной процедуры получены строгие уравнения возбуждения спирального волновода в экране. Используя полученные уравнения, при решении задач оптимизации ЛБВ можно непосредственно оптимизировать шаг навивки спирали [7-А].

При расчетах ЛБВ со спиралью в экране, закрепленной диэлектрическими стержнями, используется традиционная одноволновая модель, в которой учтены следующие существенные для ее полноты факторы: релятивизм, силы взаимодействия крупных частиц, моделирующих электронный поток (используется одномерная модель), омические потери в спирали и поглотителе, диэлектрические опоры спирали, уравнения возбуждения нерегулярной спиральной ЗС. В этой модели сопротивление связи R_s в каждом сечении считается заданным как функция относительной фазовой скорости $\beta_{\phi} = V_{\phi} / c$ и приведенной частоты $W = f / f_0$, f_0 – опорная частота. Для нахождения этой зависимости предложен оригинальный метод расчета дисперсии спирали, закреп-

ленной стержнями, который сводит решение к задаче о расчете электромагнитных полей в пространстве между спиралью и экраном, заполненным материалом, диэлектрическая проницаемость $\epsilon(r)$ ($R_0 < r$) которого меняется только в радиальном направлении. Полученная задача эффективно решается известным методом прогонки. Подбор закона изменения $\epsilon(r)$ для заданного поперечного сечения опор производится методом эквивалентной замены [2-А].

С использованием метода эквивалентной замены установлены закономерности изменения фазовой скорости и сопротивления связи от геометрии ЗС (радиус и шаг спирали, форма и ϵ опор) в наиболее интересном для спиральных ЛБВ диапазоне напряжений электронного пучка $2 \text{ кВ} < U_0 < 12 \text{ кВ}$. В частности выявлены закономерности возрастания замедления $1/\beta_\phi$ с увеличением диэлектрической проницаемости опор при фиксированном шаге намотки спирали, причем этот эффект наиболее выражен в случае, когда площадь опоры сосредоточена вблизи спирали.

Для конфигурации опор, при которой функция $\epsilon(r)$ убывает с увеличением r , установлена закономерность увеличения замедления при монотонном изменении формы опор с одновременным возрастанием сопротивления связи, характерный вид которой представлен на рисунке 2. Найденные закономерности позволяют проектировать ЛБВ с управлением замедления вдоль области взаимодействия как за счет изменения шага спирали, так и за счет формы и диэлектрической проницаемости опор при фиксированном шаге намотки спирали.

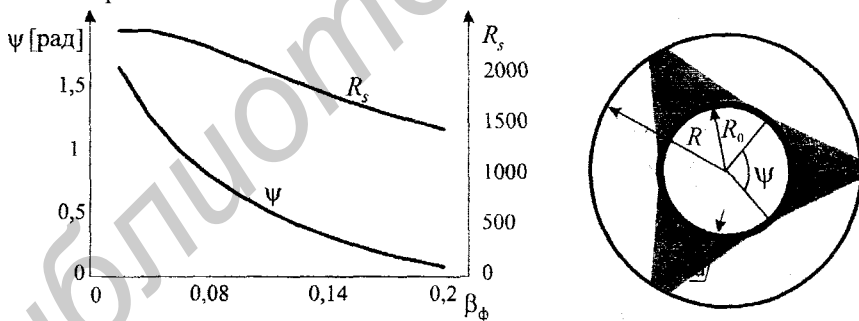


Рисунок 2 – Характерная зависимость R_s и формы диэлектрических опор от относительной фазовой скорости

Особенность простейшей одноступенчатой рекуперации в том, что она эффективна при условии отсутствия отдельных фракций сильно замедленных электронов. Обеспечение требуемого распределения электронов по энергиям на выходе ЗС осуществляется за счет соответствующего подбора параметров управления усилением. В качестве целевой функции при этом используется величина технического КПД $\eta_T = \eta_e (\gamma_0 - 1) / (\gamma_0 - \gamma_{\min})$. Здесь γ_0 – релятиви-

стский фактор электронов вначале области взаимодействия, γ_{\min} – релятивистский фактор электрона с минимальной скоростью, соответствующей напряжению на коллекторе U_k . Анализ показывает, что при $\eta_e \rightarrow 0$ величина $\eta_T \rightarrow 1$ т.к. знаменатель стремится к нулю. В виду этой особенности задача оптимизации является двухкритериальной, и целевая функция выбирается в виде $F_c = \max[(1 - \alpha_T)\eta_v + \alpha_T\eta_T]$.

Во *второй главе* на основе предложенных методов нахождения профиля фазовой скорости вдоль ЗС установлены параметры и исследованы характеристики предельных по эффективности режимов усиления спиральных ЛБВ-О [3–А, 8–А, 9–А, 12–А, 13–А, 15–А, 16–А, 19–А].

Анализ известных способов нахождения оптимального по КПД ЛБВ профиля фазовой скорости в холодной ЗС указывает на то, что для расчета первой секции двухсекционных ЛБВ-О наилучшим является метод синхронного электрона. Этот метод учитывает физические закономерности, происходящие на начальном участке «захвата» электронов бегущей волной при группировке их в сгустки и выдает характерный для начального участка ЛБВ оптимальный профиль холодной фазовой скорости. Для расчета же второй секции, в которую попадает уже сгруппированный электронный поток, а амплитуда сигнала вначале секции равна нулю, использование метода синхронного электрона неприемлемо.

Несмотря на различие в физических принципах и конечных результатах используемых способов повышения КПД ЛБВ, общим для них является монотонное уменьшение холодной фазовой скорости волны в области отбора энергии от фазового сгустка электронов пучка при одновременном нарастании амплитуды сигнала. Такие условия в выходной секции можно смоделировать используя гипотетическую ЗС, в которой фазовая скорость V_ϕ в сечении z полностью определяется амплитудой A усиливаемого сигнала в том же сечении $V_\phi(z) = f(A(z))$. В реальных ЛБВ амплитуда в конце лампы растет экспоненциально, а ЗС имеет ограничения по скорости и величине изменения фазовой скорости, поэтому естественно учитывает реальные процессы экспоненциальная функция вида $V_\phi = V_{\phi 0} - \alpha_1(1 - e^{-\alpha_2 A^2(z)})$. Предлагаемая зависимость определяется тремя параметрами $V_{\phi 0}, \alpha_1, \alpha_2$, подбирая которые из условия максимального КПД находился оптимальный профиль фазовой скорости вдоль ЗС выходной секции. Метод нахождения оптимального изменения фазовой скорости на основе такой модели получил название «метод авторегулировки замедления». Используя тот факт что на выходном участке фазовая скорость монотонно убывает вдоль ЗС была также предложена простая аппроксимация такой зависимости в виде кубического полинома $V_\phi(z) = P_3(z, V_{\max}, V_{\min}, V'_{\phi 1})$, определяемого тремя параметрами. Были проведены многочисленные расчеты

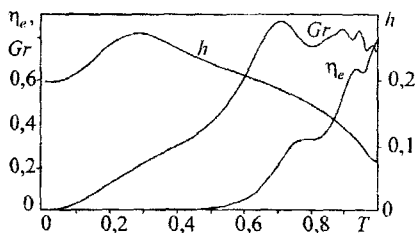
и отработана методика использования вышеприведенных методов при поиске предельных по эффективности режимов работы двухсекционных ЛБВ с нерегулярной фазовой скоростью спиральных ЗС [3–А].

Предельные характеристики ЛБВ с изменяющимся шагом спирали исследованы для типичной ЛБВ в диапазоне $\lambda_0=6$ см ($f_0=5$ ГГц), скорость электронов $\beta_0=0,14$ ($U_0\approx 5$ кВ), радиус спирали $R_0=0,22$ см радиус электронного потока $r_0=0,18$ см, диаметр провода спирали $d=0,035$ см. Спираль закреплена опорами в виде трех диэлектрических цилиндров круглого сечения с $\epsilon=4$ в экране радиуса $R=0,853$ см. Ток пучка I_0 ограничивался значением 0,45 А (длинноимпульсный режим). Для получения оптимального варианта наряду с оптимизацией параметров и профиля ЗС проводилась оптимизация начальной амплитуды сигнала, длины области взаимодействия, тока пучка.

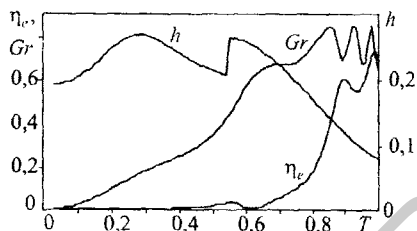
Для выяснения теоретически предельно возможного КПД с учетом одноступенчатой рекуперации при максимальном электронном КПД был произведен поиск параметров «прозрачной» ЛБВ (без локального поглотителя) с использованием метода синхронного электрона. В результате найден вариант с техническим КПД $\eta_T=0,86$ при $\eta_e=0,81$, коэффициенте усиления $K_y=33$ Дб при значениях основных параметров: длина ЗС $L=17,56$ см, ток пучка $I_0=0,258$ А, выходная мощность $P_{\text{вых}}=1,04$ кВт. Полученная гистограмма распределения по энергиям электронов пучка на выходе ЗС показывает, что 87,5% электронов составляют заторможенные до 0,25–1,4 кВ при 6,2% ускоренных до 4,8–5,8 кВ. Полоса усиления на уровне $\eta_T = 0,8$ составляет 40%, на уровне $\eta_T = 0,7$ – 110%. Вклад одноступенчатой рекуперации составляет 5%. Следует отметить, что «прозрачная» ЛБВ с полученным коэффициентом усиления нереализуема, ввиду эффекта самовозбуждения и эти параметры могут служить ориентиром, к которому следует стремиться.

Предельные возможности двухсекционной ЛБВ с изменяющимся шагом спирали характеризует найденный вариант с теми же основными параметрами, что и вышеприведенный, но с использованием поглотителя с затуханием 32ДБ, расположенного на участке $0,55 < z/L < 0,65$. Первая секция рассчитывалась методом синхронного электрона. Для расчета второй секции использовался вначале метод авторегулировки замедления, и после уточнения начальных параметров метод кубической параболы. В результате получен вариант с техническим КПД таким же, как и у «прозрачной» ЛБВ при несколько меньшем электронном КПД и увеличенном значении тока пучка: $\eta_T=83\%$, $\eta_e=72\%$, $K_y=32$ Дб при $L=14,9$ см, $I_0=0,42$ А, $P_{\text{вых}}=1,46$ кВт.

На рисунке 3 представлено изменение основных характеристик вдоль ЗС полученных вариантов «прозрачной» и двухсекционной ЛБВ: $T = z/L$, шаг спирали h [см], функция группировки Gr и электронный КПД η_e .



а) прозрачная ЛБВ-О



б) двухсекционная ЛБВ-О

Рисунок 3 – Распределение h , Gr и η_e вдоль ЛБВ-О

Высокий КПД получен как вследствие достижения значительного уровня группировки пучка как раз на участке интенсивного отбора энергии, так и обеспечения длительного удержания сформированного сгустка в тормозящей фазе на этом участке. Эти условия обеспечиваются за счет плавного изменения шага спирали (пропорционального найденному распределению $V_{\phi}(z)$) в пределах каждой секции. В первой секции функция $h(z)$ имеет характерный максимум, во второй секции $h(z)$ монотонно убывает. Падение амплитуды сигнала (и соответственно η_e) на поглотителе компенсирует характерный скачок замедления, обеспечиваемый резким увеличением шага спирали сразу после поглотителя, а так же увеличение тока пучка. Полученное распределение электронов по энергиям на выходе ЗС обоих вариантов примерно одинаково и за счет немного большей скорости максимально заторможенного электрона технический КПД примерно одинаков при несколько меньшем электронном КПД двухсекционной ЛБВ. Полоса частот двухсекционной ЛБВ меньше на 10% по сравнению с прозрачной. Выполненные расчеты показали, что в ЛБВ с регулярной но не одинаковой ЗС в каждой секции при тех же остальных параметрах максимальный КПД составил $\eta_T=55\%$, $\eta_e=29\%$, $K_y=29,4$ Дб при $L=9,5$ см, шаг спирали первой и второй секций $h_1=0,44$, $h_2=0,185$, $I_0=0,45$ А, $P_{\text{вых}}=0,6$ кВт. Т.о. за счет использования плавного изменения фазовой скорости в двухсекционной спиральной ЗС можно повысить эффективность и выходную мощность ЛБВ в два раза.

Трудности, связанные с технологией изготовления ЗС с нерегулярной навивкой спирали пока не позволяют использовать этот эффект в полной мере. Как следует из результатов первой главы, плавное изменение закона фазовой скорости можно обеспечить при регулярной навивке спирали за счет изменения, как диэлектрической проницаемости опорных стержней, так и их формы. В диссертации предложена двухсекционная ЛБВ с диэлектрической коррективной замедления и регулярной навивкой спирали. Оптимальное изменение диэлектрической проницаемости (или формы опор, задаваемых углом ψ на рисунке 2) в пределах выходной секции находилось методом ав-

торегулировки замедления в котором закон $V_{\phi}(A)$ получался из рассчитанных зависимостей $V_{\phi}(\epsilon)$ (или $V_{\phi}(\psi)$) по методике описанной в главе 1.

Исследования такой лампы выполнено для: $\lambda = 10$ см, $\beta_0 = 0,14$ ($U_0 = 5,0$ кВ), $R_0 = 0,15$ см, $R = 0,35$ см, диаметр провода спирали $d = 0,1$ см. Шаг спирали $h = 0,24$ см, $r_0 = 0,1$ см. Первая секция задавалась регулярной.

Для ЛБВ с плавным изменением диэлектрической проницаемости опорных стержней получено $\eta_T = 0,65$, $\eta_e = 0,50$, $K_y = 29,5$ ДБ при $L = 21,5$ см, $I_0 = 0,17$ А, $P_{\text{вых}} = 0,42$ кВт. Для ЛБВ с плавным изменением угла ψ , характеризующего форму опорных стержней, конфигурация которых представлена на рисунке 2 получено $\eta_T = 0,72$, $\eta_e = 0,52$, $K_y = 32,1$ ДБ при $\epsilon = 12$, $L = 22,7$ см, $I_0 = 0,12$ А, $P_{\text{вых}} = 0,32$ кВт.

На рисунке 4 приведены характеристики $\eta_e(T)$, $Gr(T)$ и $\epsilon(T)$, $\psi(T)$ этих вариантов. Как видно из графика, для получения оптимальных по эффективности режимов, как величина ϵ , так и угол ψ плавно увеличиваются, обеспечивая соответствующее возрастание замедления к концу выходной секции. Полоса усиления обоих вариантов на уровне $\eta_e = 0,50$ превышает 100%, что не хуже, чем у вышерассмотренных нерегулярных ЛБВ. Полученные результаты указывают на то, что за счет диэлектрической корректировки замедления только в выходной секции можно повысить КПД на 20% по сравнению с аналогичной регулярной ЛБВ.

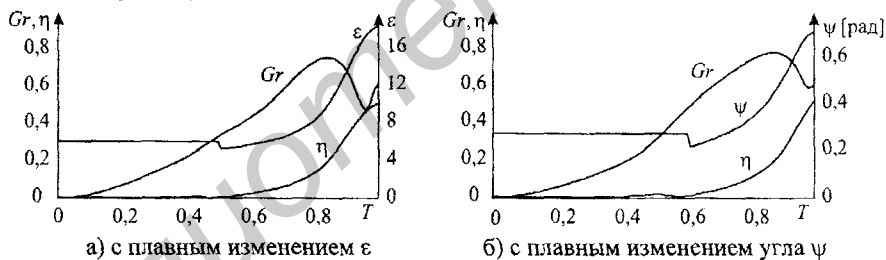


Рисунок 4 – Распределение ϵ и ψ вдоль ЛБВ

с диэлектрической корректировкой замедления Еще одну модификацию ЛБВ с регулярной навивкой спирали и корректировкой замедления за счет изменения свойств опор представляет предложенная в диссертации ЛБВ с **авторегулировкой замедления**. В такой ЛБВ замедление является пропорциональной функцией от амплитуды сигнала. Исследована ЛБВ с зависимостью вида $V_{\phi} = V_{\phi 0} - \alpha A^2$. Выяснено, что максимальный электронный КПД таких ламп составляет 70%, при полосе частот такой же, как и в регулярной ЛБВ. Амплитудная характеристика при наличии такой автоподстройки несколько отстает от аналогичной, при фиксированном нерегулярном замедлении.

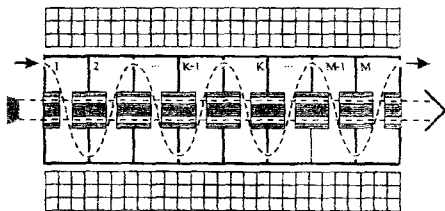


Рисунок 5 – ЛБВ на ЦСР

является многопараметрической и расчет даже одного варианта представляет сложную итерационную, плохо сходящуюся, процедуру. Для решения этой проблемы в диссертации впервые разработана модификация метода синхронного электрона, позволяющего находить такое распределение амплитуд и фаз на зазорах, при которых обеспечивается монотонный отбор энергии пучка вдоль ЦСР. В простейшем случае, когда не учитываются условия реализуемости и отсутствует обратная волна для такой «прозрачной» лампы с параметрами: $\lambda = 10$ см, $\beta_0 = 0,14$ ($U_0 = 5,0$ кВ), радиус трубки дрейфа $R_0 = 0,15$ см, ток пучка $I_0 = 0,5$ А, радиус $r_0 = 0,08$ см, ширина зазоров $L_k = 0,1$ см, количество резонаторов $M = 16$ с помощью предложенной методики найден вариант с $\eta_e = 0,78$ при общей длине $L = 13,6$ см, $K_y = 45$ Дб. Полученный вариант демонстрирует высокие потенциальные возможности увеличения эффективности ЛБВ с нерегулярной ЦСР. Характеристики этого варианта, приведенные на рисунке 6, а указывают на то, что процессы взаимодействия в такой оптимизированной ЛБВ на ЦСР происходят аналогично как и в оптимизированной спиральной (см. рисунок 3,а).

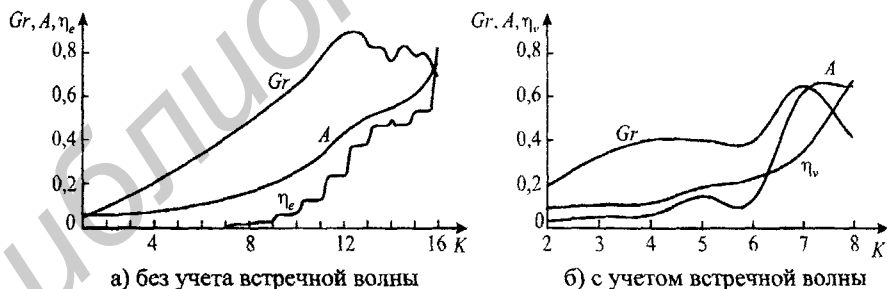


Рисунок 6 – Изменение характеристик взаимодействия вдоль ЦСР

Для получения реализуемых параметров ЦСР с учетом обратной волны разработана итерационная методика синхронного электрона с использованием согласованной в холодном режиме на заданной частоте эквивалентной схемы из последовательности четырехполюсников в виде LC контуров с трансформаторной связью, между которыми подключаются активные эле-

В третьей главе разработана методика, выполнена оптимизация параметров и проведен анализ оптимальных по КПД режимов ЛБВ-О на нерегулярной цепочке связанных резонаторов (рисунок 5) [1–А, 4–А, 18–А, 19–А]. Задача прямой оптимизации нерегулярной ЦСР

менты. Для лампы, имеющей $M=8$ резонаторов с выше приведенными параметрами пучка и размером зазоров детально исследовано влияние встречной волны на процесс взаимодействия и найден вариант нерегулярной ЦСР в котором: $\eta_e=0,66$, $K_y=9$ Дб при $I_0=0,2$ А, ширина зазоров $L_k=0,1$ см. Характеристики полученного варианта приведены на рисунке 6,б. Видно, что в отличие от идеального варианта, функция группировки и функция амплитуды на первых 6 резонаторах не монотонные, хотя и обеспечивают монотонный рост КПД. Ввиду малого коэффициента усиления такую лампу целесообразно использовать в качестве выходной секции каскадных усилителей.

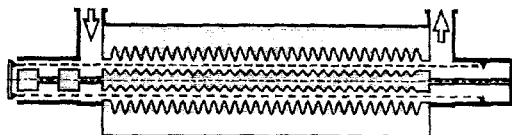


Рисунок 7 – Коаксиальная ЛБВ-О

В четвертой главе разработана математическая модель, найдены оптимальные по КПД параметры и исследованы характеристики ЛБВ-О на коаксиальном гофрированном волноводе с пространственно развитым релятивистским трубчатым пучком (рисунок 7) [5-А, 6-А, 10-А – 12-А, 15-А]. В качестве рабочей используется квази- T волна, а границы изменения радиусов коаксиала выбраны так, что высшие моды не распространяются. Благодаря продольному искривлению граничных поверхностей волновода в квази- T волне имеется продольная составляющая электрической напряженности E_z , которая и обеспечивает механизм взаимодействия О-типа. В рассмотренном приближении впервые получены уравнения возбуждения коаксиального гофрированного волновода с использованием метода преобразования координат, при котором нерегулярный коаксиальный волновод отображается на волновод с регулярными границами.

С использованием полученной математической модели изучена структура квази- T волн, распространяющихся в периодическом волноводе. Рассчитаны дисперсионные характеристики и выявлены параметры гофрировки, при которых обеспечивается наличие замедленной ($0,5 \leq \beta_\phi < 1$) гармоники в спектре возбуждаемого электромагнитного поля. Анализ характеристик переносимых мощностей показывает, что отношение между величинами переносимой вправо и влево энергии в «волне Флоке» зависит от величины замедления: с увеличением замедления возрастает доля мощности обратной парциальной волны в «волне Флоке». Установлено, что в реальных приборах, где обеспечиваются условия согласования на концах и большое замедление, «волна Флоке» в чистом виде не реализуется.

В результате компьютерного поиска были получены перспективные для использования варианты усилительной ЛБВ: с постоянной высотой гофра

$\eta_e=0,3$, с переменной высотой гофра $\eta_e=0,74$ с $K_y = 12-25$ дБ при начальной скорости электронов $0,5 \leq \beta_0 \leq 0,75$ с микропервеансом пучка $10 \geq p_\mu \geq 6$. Расчеты показали возможность реализации генератора с $\eta_e=0,5$ с обратной связью на встречной волне и гофрировке с изменяющейся глубиной.

Ввиду того, что в квази- T волне величина поперечной E_t -составляющей оказывается значительной, вопрос о необходимой величине сопровождающего магнитного поля требует тщательного исследования на основе двумерной модели. Влияние двумерных эффектов было изучено при

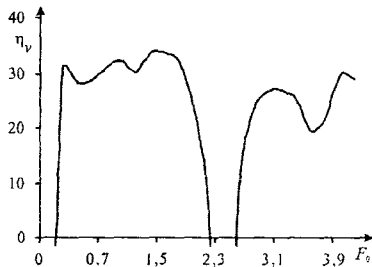


Рисунок 8 – Зависимость КПД от величины магнитного поля

расчетах варианта ЛБВ с регулярным гофром при $L = 30\lambda / 2\pi$, количестве периодов гофра $n = 30$, высоте наружного гофра $h_2 = 1,45\lambda / 2\pi$ (внутренняя гофрировка отсутствовала $h_1=0$), $\beta_0 = 0,5$, $I_0 = 350A$, $r_0 = 0,95$. Полученная зависимость волнового КПД (η_v) от нормированной величины продольного фокусирующего магнитного поля F_0 представлена на рисунке 8. Обнаруженный срыв генерации при $1,8 < F_0 < 2,6$ объясняются тем, что в этой

области создаются благоприятные условия гирорезонансного взаимодействия электронов со встречной волной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Впервые получены уравнения возбуждения спирального волновода в экране с переменным по длине углом навивки спирали на основе операции отображения в пространство, где спираль оказывается регулярной и с применением проекционной процедуры. Благодаря полученной модели, при решении задач оптимизации ЛБВ можно непосредственно оптимизировать функцию навивки спирали, т.е. проблема синтеза нерегулярной оптимальной спиральной замедляющей системы снимается [7–А, 20–А].

2. Разработан оригинальный метод расчета дисперсии спирали, закрепленной в экране диэлектрическими опорными стержнями произвольной формы поперечного сечения. Один из основных методов решения этой проблемы состоит в том, что с помощью эквивалентной замены, диэлектрик равномерно распределяется по всей области между экраном и спиралью и тем самым задача сводится к задаче с известным решением. Этот метод не учитывает радиального распределения диэлектрика. Предложенный метод сводит решение к

задаче о расчете электромагнитных полей в пространстве между спиралью и экраном, заполненным материалом, диэлектрическая проницаемость $\epsilon(r)$ которого меняется только в радиальном направлении. Подбор закона изменения $\epsilon(r)$ для заданного поперечного сечения опор производится методом эквивалентной замены. С использованием этого метода найдены условия, при которых уменьшение фазовой скорости сопровождается возрастанием сопротивления связи ЗС при изменении шага спирали, диэлектрической проницаемости и формы опор в наиболее интересном для спиральных ЛБВ диапазоне напряжений электронного пучка $2 \text{ кВ} < U_0 < 12 \text{ кВ}$ [2–А].

3. Впервые предложен и обоснован метод авторегулировки замедления для нахождения оптимального изменения фазовой скорости вдоль выходной секции спиральной ЛБВ. Идея метода основана на той физической закономерности, что в выходной секции одновременно с возрастанием замедления имеет место возрастание амплитуды усиливаемого сигнала. В соответствии с этим в модели задается зависимость фазовой скорости от амплитуды и двух-трех параметров вида $V_\phi = V_\phi [A(z), \vec{\alpha}]$. Параметры находятся из условия максимизации КПД. Предложены конкретные зависимости (линейная и экспоненциальная), при которых естественно учитываются физические закономерности отбора энергии и доказана эффективность этого метода. В результате компьютерного поиска впервые установлены закономерности распределения шага спирали во входной и выходной секциях нерегулярной двухсекционной ЛБВ, при которых создаются оптимальные условия группирования и последующего отбора энергии электронов с электронным КПД=72% и техническим КПД=86% с простейшей одноступенчатой рекуперацией. Во входной секции распределение холодной фазовой скорости ЗС имеет характерный максимум, компенсирующий замедление «горячей» фазовой скорости в начальный момент формирования сгустка электронов. Благодаря этому достигается значительный уровень группирования пучка. Падение амплитуды сигнала на поглотителе компенсируется характерным скачком фазовой скорости и последующим ее монотонным убыванием вдоль выходной секции по рассчитанному закону [3–А, 8–А, 9–А, 13–А, 14–А, 16–А, 17–А].

4. Разработана математическая модель и модификация метода синхронного электрона для ЛБВ с нерегулярной ЦСР на основе согласованной в холодном режиме эквивалентной схемы из последовательности четырехполосников, между которыми подключены активные элементы. Впервые полученные параметры цепочек неидентичных связанных резонаторов, при которых, за счет более длительного сопровождения формируемого сгустка, КПД составляет более 70%. Это является обоснованием целесообразности создания ЛБВ с нерегулярными ЦСР [1–А, 4–А, 18–А, 19–А].

5. Разработана двумерная нелинейная математическая модель ЛБВ-О на квази-Т волне коаксиального гофрированного волновода с использованием метода преобразования координат, при котором нерегулярный коаксиальный волновод отображается на волновод с регулярными границами. На основе этой модели установлено, что соотношение между переносимой влево и вправо энергией в поле «волны Флоке» зависит от замедления и как следствие показано, что в реальных приборах «волна Флоке» в чистом виде не реализуется. Рассчитаны дисперсионные характеристики ЗС этой лампы и выявлены параметры гофрировки, при которых обеспечивается наличие замедленной гармоники ($0,5 < \beta_\phi < 0,75$) в спектре возбуждаемого электромагнитного поля. В результате компьютерного поиска найдены условия, при которых КПД составляет 70%, а для генератора отражательного типа – 50%. Обнаружены условия срыва генерации, при определенных значениях магнитного поля, благоприятствующих гирорезонансному взаимодействию электронов с поперечной компонентой поля [5–А, 6–А, 10–А – 12–А, 15–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные математические модели, новые эффективные методы и созданные пакеты программ позволяют проводить эффективный поиск оптимальных процессов и перспективных конструкций ЛБВ-О с различными ЗС – спиральными, ЦСР и на коаксиальном гофрированном волноводе.

Доказанная возможность получения КПД ЛБВ с нерегулярной ЦСР вдвое большего, по сравнению с регулярными ЦСР, стимулирует интерес к дальнейшему экспериментальному исследованию таких приборов.

Обоснование эффективного усиления квази-Т волны коаксиального гофрированного волновода открывает возможность создания ЛБВ большой мощности на пространственно развитом трубчатом электронном пучке.

Полученные результаты могут быть использованы на предприятиях Беларуси, России, Украины и других стран при разработке и изготовлении ЛБВ-О средней и большой мощности.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статья в научных журналах

1–А. Оптимизация нерегулярной ЛБВ типа «О» на цепочке связанных резонаторов / А.А. Кураев, А.А. Навроцкий, Б.М. Парамонов, А.К. Сеницын // Радиотехника и электроника. – 1994. – Т. 39. – № 2. – С. 288–296.

2–А. Сеницын, А. К. Расчет дисперсионных характеристик спиральной замедляющей системы / А. К. Сеницын, А. А. Навроцкий // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40. – № 11. – С. 1696–1705.

3–А. Лампа бегущей волны с авторегулировкой замедления / А.А. Кураев, А.А. Навроцкий, Т.Л. Попкова, А.К. Синицын // Электромагнитные волны & электронные системы. – 1998. – Т. 3. – № 4. – С. 47–50.

4–А. Оптимизация ЛБВ-О на нерегулярной цепочке связанных резонаторов / А.В. Аксенчик, А.А. Кураев, А.А. Навроцкий, А.К. Синицын // Электромагнитные волны & электронные системы. – 2000. – Т. 5. – № 2. – С. 28–34.

5–А. Кураев, А.А. Теория и оптимизация ламп бегущей волны О-типа на основной волне коаксиального гофрированного волновода / А. А. Кураев, А. К. Синицын, А. А. Навроцкий // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46. – № 7. С. 877–882.

6–А. Кураев, А.А. Поля Флоке и волны в периодических продольно-нерегулярных волноводах / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навроцкий // Электромагнитные волны & электронные системы. – 2003. – Т. 8. – № 1. – С. 4–9.

7–А. Кураев, А.А. Спиральная замедляющая система с нерегулярной навивкой для спутниковых ЛБВ / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навроцкий // Вести Национальной академии наук Беларуси.– Серия физико-технических наук. – 2004. – № 3. – С. 69–75.

8–А. Кураев, А.А. Оптимизированная по КПД нерегулярная ЛБВ с одноступенчатой рекуперацией / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навроцкий // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50. – № 10. – С. 1304–1307.

Материалы конференций

9–А. Kurayev, A.A. TWT with Auto-Tuning of Delay / A.A. Kurayev, A.K. Sinitsyn, A.A. Navtotsky // IVEC. – Monterey, USA. – 2000. – P. 2.2.

10–А. Кураев, А.А. ЛБВ-О на коаксиальном гофрированном волноводе ЦСР / А. А. Кураев, А. К. Синицын, А. А. Навроцкий // Труды 10-й международной крымской конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь. – 2000. – С. 21–22.

11–А. Кураев, А.А. Двумерные эффекты в ЛБВ-О на коаксиальном гофрированном волноводе / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навроцкий // Труды 11-й международной крымской конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь. – 2001. – С. 175–176.

12–А. Кураев, А.А. Моделирование ЛБВ-О на E_{01} -Г волне коаксиального гофрированного волновода / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навроцкий // Труды 13-й международной крымской конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь. – 2003. – С. 245–246.

13–А. Кураев, А.А. Оптимизация спиральных ЛБВ с одноступенчатой рекуперацией / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навроцкий // Труды 13-й международной крымской конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь. – 2003. – С. 247–248.

14–А. Кураев, А.А. Optimized irregular TWT with one-stage recuperation and efficiency of over 80%. / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навротский // Fourth IEEE International Vacuum Electronics Conference. – Seoul, Korea. – 2003. – С. 207–208.

15–А. Кураев, А.А. TWT with combined symmetric $E_{01}+T$ wave of coaxial corrugated waveguide / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навротский // Fourth IEEE International Vacuum Electronics Conference. – Seoul, Korea. – 2003. – С. 209–210.

16–А. Кураев, А.А. Спиральная ЛБВ с диэлектрической корректировкой замедления / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навротский // Труды 19-й международной крымской конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь. – 2009. – С. 165–166.

17–А. Кураев, А.А. Метод авторегулировки замедления для оптимизации распределения фазовой скорости в спиральной ЛБВ / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навротский // Труды 19-й международной крымской конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь. – 2009. – С. 163–164.

Тезисы докладов

18–А. Кураев, А.А. Оптимизация нерегулярной ЛБВ-0 на ЦСР методом синхронного электрона / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навротский // Тезисы научной конференции «30 лет БГУИР» – Минск: БГУИР. – 1994. – С. 62–63.

19–А. Кураев, А.А. Оптимизация ЛБВ-0 на ЦСР / А. А. Кураев, А. К. Синицын, А. А. Навротский // Тезисы докладов НТК. Современные проблемы радиотехники, электроники и связи. – Минск: БГУИР. – 1995. – С. 165–166.

Другие публикации

20–А. Кураев, А.А. Усилители на основе эффекта Вавилова – Черенкова с нерегулярными замедляющими системами / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.А. Навротский // Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот: в 2 т. / А.В. Аксенчик [и др.]; под общ. ред. А.А. Кураева, Д.И. Трубецкова. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2009 – Т. 1: Стационарные процессы. – 2009. – Гл. 3. – С. 121–172.

Наўроцкі Анатоль Аляксандравіч
ТЭОРЫЯ І АПТЫМІЗАЦЫЯ ЛБХ-О З НЕРЭГУЛЯРНЫМІ
ЭЛЕКТРАДЫНАМІЧЭСКИМІ СІСТЭМАМІ

Ключавыя словы: Звышвысокія частоты, аптымізацыя, СВЧ-электроніка, лампа бягучай хвалі (ЛБХ), спіральная запавольваючая сістэма, ланцужок звязаных рэзанатараў (ЛЗР), кааксіяльная запавольваючая сістэма.

Мэта работы: стварэнне адэкватных матэматычных мадэляў і эфектыўных метадаў разліку ЛБХ-О з нерэгулярнымі запавольваючымі сістэмамі трох тыпаў (спіральнай, на ЛЗР на кааксіяльным гофры), вывучэнне на іх аснове фізічных эфектаў і ўсталяванне заканамернасцяў узаемадзеяння электроннага струменя са што ўзбуджаецца ў такіх лампах электрамагнітнай хвалі пры аптымальных па ККД режимах.

Метады даследавання: метады сетак, метады прагонкі, метады Рунге-Кутты, метады Нелдзэра-Міда, метады пераўтварэння каардынат.

Атрыманыя рэзультаты: Атрыманні ўраўненні ўзбуджэння спіральнага хвалёвага ў экране з пераменным крокам навіўкі спіралі на аснове аперацыі адлюстравання ў прастору, дзе спіраль аказваецца рэгулярнай. Распрацаваны метады разліку дысперсіі спіралі, замацаванай у экране дыэлектрычнымі апорнымі стрыжнямі адвольнай формы папярочнага сячэння. Прапанаваны і згрунтаваны метады аўтарэгуліроўкі замаруджвання для знаходжання аптымальнай змены фазавай хуткасці ўздоўж выхадной секцыі спіральнай ЛБХ. Устаноўлены характарыстыкі двухсекцыйнай ЛБХ з пераменным крокам спіралі і аднаступенчатым рекупэратарам, пры якіх дасягнуты электронны ККД = 72% і тэхнічны ККД = 86%. Распрацавана матэматычная мадэль для ЛБХ з нерэгулярнай ЛЗР. Атрыманыя параметры ЛЗР пры якіх ККД складае больш за 70%. Распрацавана двухмерная нелінейная матэматычная мадэль ЛБХ-О на квазі-Т хвалі кааксіяльнага гафрыраванага хвалёвага з выкарыстаннем метаду пераўтварэння каардынат. Даследаваныя заканамернасці пераносу энергіі ў «хвалі Флаке». Знайдзены ўмовы, пры якіх ККД складае 70%, а для генератара адлюстравальнага тыпу – 50%. Даследаваны ўмовы зрыву генерацыі.

Вынікі могуць быць выкарыстаны ва ўстановах, якія займаюцца пытаннямі распрацоўкі высокаэфектыўных ЛБХ-О.

РЕЗЮМЕ

Навроцкий Анатолий Александрович

ТЕОРИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЛБВ-О С НЕРЕГУЛЯРНЫМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Ключевые слова: сверхвысокие частоты, оптимизация, СВЧ-электроника, лампа бегущей волны (ЛБВ), спиральная замедляющая система, цепочка связанных резонаторов (ЦСР), коаксиальная замедляющая система.

Цель работы: создание адекватных математических моделей и эффективных методов расчета ЛБВ-О с нерегулярными замедляющими системами трех типов (спиральной, на ЦСР, на коаксиальном гофре), изучение на их основе физических эффектов и установление закономерностей взаимодействия электронного потока с возбуждаемой в таких лампах электромагнитной волной при оптимальных по КПД режимах.

Методы исследования: метод сеток, метод прогонки, метод Рунге-Кутты, метод Нелдера-Мида, метод преобразования координат.

Полученные результаты: Получены уравнения возбуждения спирального волновода в экране с переменным шагом навивки спирали на основе операции отображения в пространство, где спираль оказывается регулярной. Разработан метод расчета дисперсии спирали, закрепленной в экране диэлектрическими опорными стержнями произвольной формы поперечного сечения. Предложен и обоснован метод авторегулировки замедления для нахождения оптимального изменения фазовой скорости вдоль выходной секции спиральной ЛБВ. Установлены характеристики двухсекционной ЛБВ с переменным шагом спирали и одноступенчатым рекуператором, при которых достигнут электронный КПД=72% и техническим КПД=86%. Разработана математическая модель для ЛБВ с нерегулярной ЦСР. Полученные параметры ЦСР при которых КПД составляет более 70%. Разработана двумерная нелинейная математическая модель ЛБВ-О на квази-Т волне коаксиального гофрированного волновода с использованием метода преобразования координат. Исследованы закономерности переноса энергии в «волне Флоке». Найдены условия, при которых КПД составляет 70%, а для генератора отражательного типа – 50%. Исследованы условия срыва генерации.

Результаты могут быть использованы организациями, занимающимися разработкой высокоэффективных ЛБВ-О.

SUMMARY

Navtotsky Anatoli Alyaksandrovich

THE THEORY AND OPTIMISATION OF THE TWT-O WITH THE IRREGULAR ELECTRODYNAMIC SYSTEMS

Key words: superhigh frequencies, optimisation, microwave electronics, travelling wave tube (TWT), a spiral slow-wave structure, a coupled-cavities, a coaxial slow-wave structure.

The aim of work: Making of adequate mathematical models and effective computational methods of the TWT-O with the irregular slow-wave structures of three types (spiral, on coupled-cavities, on a coaxial corrugation), study on their basis of physical effects and an establishment of behaviors of interaction of an electronic beam with an electromagnetic wave actuated in such lamps at optimum regimes on efficiency.

Research Methods: net method, a sweep method, a method of the decision ODE Runge-Kutt, a method of optimization Nelder-Mid, a method of a transformation of co-ordinates.

The received results: the equations of drive of a spiral waveguide in the shield with a variable step of the turning of a helix on the basis of display operation in space where the helix appears regular Are gained. The computational method of a dispersion of the helix fixed in the shield by the dielectric basic rods of the arbitrary form of a cross section is developed. The method of a centralised traffic control of deceleration for determination of an optimum modification of a phase velocity along output section of a spiral TWT is offered and justified. Performances of a two-section TWT with a variable lead of a helix and an one-step recuperator at which will attain electronic efficiencies 72 % and engineering efficiencies 86 % are erected. The mathematical model is developed for a TWT with irregular coupled-cavities. Gained parametres coupled-cavities at which efficiencies makes more than 70 %. The two-dimensional non-linear mathematical model of the TWT-O on quasis ke to a wave of the coaxial corrugated waveguide with use of a method of a transformation of co-ordinates is developed. Behaviours of transfer of energy in «to a wave the Flock» are explored. Requirements are discovered, at which efficiencies makes 70 %, and for the reflexion-type generator – 50 %. Requirements of a supression of oscillation are explored.

Effects can be used the architectures occupied in design of highly effective TWT-O.

Научное издание

**Навроцкий
Анатолий Александрович**

**Теория и оптимизация ЛБВ-О с нерегулярными
электродинамическими системами**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 29.01.2010.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 50 экз.	Заказ 121.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровка, 6.