

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.372.8

Гуринович
Алевтина Борисовна

**НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЧЕРЕНКОВСКИХ
УСИЛИТЕЛЕЙ С НЕРЕГУЛЯРНЫМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ
СИСТЕМАМИ**

01.04.03 - Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Установа адукацыі
"Віцебскі дзяржаўны ўніверсітэт
імя П.М.Машэрава"
БІБЛІЯТЭКА

Минск-2002

Работа выполнена в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники

Научный руководитель- доктор физико-математических наук, профессор
Кураев Александр Александрович
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, кафедра «Антенны и Устройства СВЧ»)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Рудницкий Антон Сергеевич
(Белорусский государственный университет, кафедра радиофизики)
кандидат физико-математических наук, ст. н. с.
Корнейчик Всеволод Всеволодович
(Научно-исследовательское республиканское

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Среди электронных приборов СВЧ средней и высокой мощности особое место занимают черенковские усилители: лампы бегущей волны О-типа (ЛБВ-О), которые, со времени их изобретения Комфнером в 1943 г., нашли весьма широкое применение в радиолокации, радионавигации, космических и наземных системах связи и в радиолокационных комплексах нового поколения с адаптивными антенными системами. Конкретные области применения определяют специфику требований к характеристикам ЛБВ-О: для космических и наземных систем связи необходимо обеспечить минимальность нелинейных искажений и линейность фазо-частотной характеристики при одновременном поддержании высокого КПД в режиме, близком к насыщению; для мощных и сверхмощных ЛБВ-О для радиолокационных комплексов на первый план выступают требования к выходной мощности и КПД.

Для решения этих проблем за счет улучшения процессов взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем электродинамической системы в черенковских приборах на протяжении многих лет ведутся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования. В существенном улучшении параметров ЛБВ-О за последние годы немаловажную роль сыграли успехи нелинейной теории в сочетании с машинными методами проектирования и оптимизации (работы Дж. Пирса, Дж. Роу, Дж. Уэлша, Л.А. Вайнштейна, В.А. Солнцева, И.А. Манькина, В.И. Канавца, В.А. Черепенина, И.И. Магды, Н.Ф. Ковалева, Г.Я. Слепая, Н.С. Гинзбурга, А.В. Сморгонского, А.А. Кураева, А.К. Силицына и их сотрудников). Благодаря им повышен электронный и промышленный КПД, улучшены фазочастотные и фазоамплитудные характеристики ЛБВ-О средней мощности для систем наземной и спутниковой связи. Однако, до выполнения настоящей работы, для решения этих задач не был в полной мере использован главный ресурс оптимизации черенковских приборов - использование нерегулярной замедляющей системы (спирали с переменным шагом, переменного по длине профиля гофрированного волновода и т.д.) для оптимального управления нелинейным процессом взаимодействия электронных потоков с полями электродинамических систем. Это объясняется, с одной стороны, отсутствием строгой теории возбуждения нерегулярных замедляющих систем (ЗС) в многочастотном режиме, которая позволила бы сформулировать математические модели ЛБВ различных типов, обеспечивающие достоверность получаемых по ним результатов, и, с другой стороны, отсутствием адекватных методов решения нелинейной задачи оптимального управления на основе этой модели.

Успехи современной электронной технологии позволили изготовить автоэмиссионные катоды с практически безинерционным управлением током эмиссии в диапазоне частот вплоть до 1000 ГГц. Такие тонкопленочные катоды при приложении постоянного напряжения на управляющей сетке 50-100В позволяют получать ток до 100 мА с площади 1мм². Модуляция сеточного напряжения такого катода сигналом частоты ω с амплитудой 0.1 ÷ 5В позволяет получать достаточно промодулированный по плотности электронный поток, чтобы возбудить в электродинамической системе электромагнитные колебания, эквивалентные входному сигналу. При малой (линейной) модуляции тока эмиссии можно достичь значительного уменьшения коэффициента нелинейных искажений сигнала в режимах максимального КПД, особенно в ЛБВ с

оптимизированной нерегулярной замедляющей системой. Это ожидание связано с тем, что благодаря уже имеющейся на входе модуляции плотности тока дополнительная фазовая группировка электронов в режиме максимального КПД еще не приведет к обычным для ЛБВ без катодной модуляции нелинейным искажениям сигнала. Между тем, возможности ЛБВ с катодной модуляцией и особенности процессов в ней до настоящей работы не анализировались.

Релятивистские ЛБВ-О с грубыми электронными потоками и замедляющей системой в виде гофрированного волновода представляются наиболее перспективными в области электроники СВЧ как источники сверхвысокой мощности. На таких ЛБВ в трехсантиметровом диапазоне получены импульсные мощности 15 ГВт, что недостижимо для любых мощных приборов другого типа: релятивистских клистронов, магнетронов, гиротронов, оротронов. Существенно, что такие результаты достигнуты без достаточной предварительной теоретической проработки и оптимизации параметров ЛБВ. Дело в том, что строгая теория релятивистской ЛБВ-О с нерегулярным волноводом в качестве замедляющей системы в настоящее время находится в стадии развития и многие ее проблемы еще не нашли полного разрешения. Следует иметь в виду, что развитие такой теории позволяет решить не только практически весьма важную задачу оптимизации параметров ЛБВ, но задачу более общего характера: впервые провести исследования оптимальных нелинейных многочастотных режимов в нерегулярных релятивистских ЛБВ, результаты которых составят комплекс новых физических знаний в области нелинейной радиофизики.

Настоящая диссертационная работа представляет собой теоретическое исследование, направленное на решение перечисленных выше проблем.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Результаты работы получены в рамках хозяйственных НИР, выполнявшихся на кафедрах «Ан-УСВЧ» и «ВМиП» под руководством А.А. Кураева в период с 1997 по 2001г. Диссертационная работа выполнялась в рамках следующих утвержденных Министерством образования РФ тем: «Провести моделирование и оптимизацию параметров и создать новые типы и конструкции приборов и устройств СВЧ» (01.01.1996г.- 31.12.2000г.); «Разработка теории возбуждения продольно-нерегулярных волноводов и ее приложение к задачам моделирования и оптимизации черенковских и гирорезонансных источников излучения СВЧ большой мощности» (31.01.1997г.- 31.12.1998г.); программы МО РФ «Нанoeлектроника. Разработка математической модели и программного обеспечения структуры активных сред на основе наноразмерных автоэмиссионных управляемых катодов для микровакuumных усилителей и генераторов» (8.05.1997г.- 31.12.2000г.); программы МО РФ «Синергетика. Сложная нелинейная динамика автогенераторов и усилителей СВЧ и эффекты самоорганизации» (1.04.1996г.- 31.12.1998г.); «Разработать модели и программное обеспечение для расчета и оптимизации выходных усилителей бегущей волны (УБВ) для информационных систем наземной и спутниковой связи» (№ гос. регистрации 99-3067, 1.01.1999- 31.12.1999г.); «Исследование оптимальных условий многочастотного взаимодействия в усилителях бегущей волны (УБВ)» (№ гос. регистрации 00-3140, 1.01.2000- 31.12.2000г.);

а также в рамках следующих тем, утвержденных Фондом фундаментальных исследований НАН РФ: «Нелинейная динамика ансамбля заряженных частиц в электромагнитных полях управляемой структуры» (01.02.1996-31.01.1998г.); «Создание комплек-

са математических моделей и методов оптимизации нелинейных процессов возбуждения произвольно-нерегулярных электродинамических систем (ИНЭС) мощными электронными потоками (МЭП)» (1.03.1998г. - 28.02.2000г.); «Создание общей теории возбуждения нерегулярных волноводов с прямоугольным сечением и приложение ее к моделированию и оптимизации СВЧ приборов и устройств» (01.04.2001-31.03.2003г.);

Цель и задачи исследования. Цель данного исследования - развитие нелинейной теории черенковских усилителей О-типа: ЛБВ-О со спиральной замедляющей системой средней мощности и релятивистских ЛБВ-О с замедляющей системой в виде гофрированного волновода высокой и сверхбольшой мощности на случай произвольно-нерегулярной замедляющей системы, многочастотного и многомодового взаимодействия, формулировка на основе этой теории нелинейной модели ЛБВ-О и использования ее для оптимизации характеристик ЛБВ-О и исследования особенностей оптимальных процессов в черенковских усилителях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Сформулировать нелинейные самосогласованные уравнения ЛБВ-О с нерегулярной спиральной замедляющей системой в многочастотном режиме;
2. Исследовать влияние возбуждения высших гармонических составляющих сигнала на полосовые характеристики спиральных ЛБВ-О с целью выяснить возможность снижения коэффициента нелинейных искажений в полосе частот за счет оптимизации профиля нерегулярной замедляющей системы;
3. Сформулировать нелинейные самосогласованные уравнения нерегулярной ЛБВ-О с катодной модуляцией (ЛБВКМ) и выяснить возможность улучшения амплитудно-частотных характеристик в оптимизированной ЛБВКМ по сравнению с обычной ЛБВ;
4. Вывести уравнения возбуждения продольно-нерегулярного гофрированного волновода негармоническими источниками и сформулировать на их основе самосогласованные нелинейные одномерные уравнения релятивистской ЛБВ-О с учетом произвольного числа гармонических составляющих сигнала и усредненных сил взаимодействия релятивистских электронов;
5. Найти оптимальные варианты релятивистских ЛБВ при различных ускоряющих напряжениях, исследовать их полосовые характеристики и оценить влияние второй гармоники сигнала на процессы фазировки электронов и энергообмена в оптимальных вариантах;
6. На основе электродинамической модели исследовать нелинейные процессы взаимодействия двух сигналов в ЛБВ на гофрированном волноводе и выяснить физические особенности формирования фазовых слугков электронов в этом случае;
7. Проверить адекватность разработанных математических моделей нелинейных процессов взаимодействия мощных ЛБВ-О путем сравнения расчетов по ним с известными экспериментальными данными, а также результатами испытаний макетов ЛБВ-О, рассчитанных по предложенным моделям.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является нелинейный процесс взаимодействия мощных электронных потоков (включая релятивистские) с полями нерегулярных электродинамических систем в черенковских усилителях типа «О». Предмет исследования в соответствии с целью и задачами работы включает в себя различные нелинейные аспекты взаимодействия: эффективность,

усиление сигнала, фазовое группирование электронов, нелинейные искажения, нелинейное взаимодействие сигналов, интермодуляция и их вклад в формирования амплитудно-фазочастотных характеристик усилителя.

Методология и методы проведенного исследования. Использовались следующие методы решения радиофизических задач: преобразование метрики пространства, проекционный метод, метод самосогласованного поля. Для поиска оптимальных вариантов применен вариационно-итерационный метод решения задач оптимального управления.

Научная новизна и значимость полученных результатов. В настоящей диссертационной работе впервые развита строгая самосогласованная нелинейная электродинамическая теория многочастотных режимов ЛБВ-О со спиральной и волноводной нерегулярными замедляющими системами (ЗС). В рамках данной теории:

- Развита нелинейная теория и построена математическая модель нерегулярной ЛБВ-О со спиральной замедляющей системой в полосе частот с учетом возбуждения произвольного числа высших гармонических составляющих. Дисперсионные характеристики рассчитывались на основе модели спирально-проводящего цилиндра. Получены и исследованы полосовые характеристики оптимизированных вариантов регулярной и нерегулярной ЛБВ. Показано, что использование нерегулярных спиральных замедляющих систем (ЗС) позволяет значительно снизить коэффициент нелинейных искажений в полосе частот.

- Сформулирована математическая модель и проведена оптимизация параметров и оптимальных режимов ЛБВ с катодной модуляцией электронного потока (ЛБВКМ) и нерегулярной спиральной замедляющей системой.

- Рассчитаны и исследованы полосовые и амплитудные характеристики оптимизированных вариантов регулярной и нерегулярной ЛБВКМ, аналогичных обычным регулярным и нерегулярным ЛБВ. Показано, что использование катодной модуляции для регулярных и нерегулярных спиральных замедляющих систем (ЗС) позволяет значительно снизить коэффициент нелинейных искажений в полосе частот, особенно в ЛБВКМ с нерегулярной ЗС. При этом удается получить высокий коэффициент усиления при малой (линейной) модуляции тока эмиссии. Полученные результаты указывают также на несомненные преимущества ЛБВКМ с нерегулярной ЗС по сравнению с обычной ЛБВ и по сравнению с ЛБВКМ с регулярной ЗС.

- Получены общие уравнения возбуждения продольно-нерегулярного волновода произвольной системой негармонических сторонних источников. В уравнениях возбуждения разделены динамические поля (поля с запаздыванием) и квазистатические поля источников, что обеспечивает равномерную сходимость рядов, представляющих динамическую часть поля.

- Сформулированы самосогласованные нелинейные одномерные уравнения релятивистской ЛБВ-О с замедляющей системой в виде произвольно-нерегулярного волновода с учетом произвольного числа гармонических составляющих сигнала и отвечающих им распространяющихся типов волн в волноводе, а также с учетом усредненных сил взаимодействия релятивистских электронов. Найдены оптимальные по КПД варианты релятивистских и слабо-релятивистских ЛБВ-О с учетом волн на второй гармонике сигнала и исследованы их полосовые и фазо-частотные характеристики. Показано, что из-за высокой дисперсии гофрированного волновода влияние волн на второй гармонике сигнала невелико. Найден оптимальный вариант релятивистской ЛБВ-О с мак-

симальным прогнозируемым электронным КПД 85%, полосой усиления 17% и линейной фазо-частотной характеристикой.

- На основе электродинамической модели исследованы нелинейные процессы взаимодействия двух сигналов в ЛБВ на гофрированном волноводе с использованием метода фундаментальной частоты. Впервые выявлены физические процессы, сопровождающие формирование фазовых электронных пакетов в двухчастотном режиме: амплитудную модуляцию сгустков на начальном участке, фазовую модуляцию и расщепление сгустков в области насыщения. Проанализировано развитие спектра гармоник тока в электронном потоке. Показано, что этот спектр значительно более сложен, чем это следует из ранее опубликованных расчетов на основе упрощенных моделей.

- В диссертации на основе предложенных моделей проведена численная оптимизация и получены оптимальные варианты ЛБВ-О в широком диапазоне токов и ускоряющих напряжений. Анализ этих вариантов указал пути улучшения КПД, уменьшения нелинейных искажений, улучшения полосовых характеристик приборов. Сами оптимальные варианты могут непосредственно использоваться при проектировании черенковских усилителей большой мощности.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что созданная автором нелинейная теория, математические модели и алгоритмы оптимизации черенковских усилителей с нерегулярными электродинамическими системами и комплексы реализующих их программ могут быть эффективно использованы на предприятиях Беларуси, России и Украины при разработках ЛБВ-О для систем наземной и космической связи с улучшенными амплитудно-частотными характеристиками, при создании релятивистских ЛБВ-О сверхбольшой мощности с повышенным КПД для радиолокационных комплексов нового поколения.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Нелинейные самосогласованные уравнения ЛБВ-О с нерегулярной спиральной замедляющей системой в многочастотном режиме.

2. Результаты исследования влияния высших гармонических составляющих в полосе частот усиления ЛБВ-О со спиральной замедляющей системой и вывод о том, что оптимизация нерегулярной ЗС в ЛБВ-О позволяет значительно снизить коэффициент нелинейных искажений сигнала.

3. Математическая модель нерегулярной ЛБВ-О с катодной модуляцией (ЛБВКМ) и результаты ее оптимизации в полосе частот, а также вывод о том, что использование катодной модуляции для регулярных и нерегулярных спиральных ЗС позволяет значительно снизить коэффициент нелинейных искажений в полосе частот, особенно в ЛБВКМ с оптимизированной нерегулярной ЗС, причем, оказывается возможным получить высокий коэффициент усиления при малой (линейной) модуляции тока эмиссии.

4. Электродинамическая теория релятивистской ЛБВ-О на нерегулярном гофрированном волноводе с учетом высших гармонических составляющих сигнала и результаты исследования оптимальных вариантов ЛБВ-О в полосе частот.

5. Впервые выявленные физические процессы, сопровождающие формирование фазовых электронных пакетов в двухчастотном режиме: амплитудная модуляция сгустков на начальном участке, фазовая модуляция и расщепление сгустков в области насыщения.

6. Оптимизированные варианты ЛБВ-О большой мощности, в том числе рекордный по КПД вариант релятивистской ЛБВ-О сверхбольшой мощности с прогнозируемым КПД 85% и полосой усиления 17%.

Личный вклад соискателя. Руководителем А.А. Кураевым определена цель и постановка ряда задач. Совместно с ним проводилось обсуждение тематики исследований и полученных результатов. Диссертанту принадлежит доминирующая роль в формулировке математических моделей, решении конкретных задач на их основе и анализе результатов, выводах и рекомендациях.

Апробация результатов диссертации. Результаты диссертационной работы докладывались на 9-й и 10-й международных Крымских микроволновых конференциях, КрыМиКо'99 и КрыМиКо'2000, Украина, 1999-2000гг. International Vacuum Electronics Conference 2000, Monterey, USA, may 2-4, 2000, Fourth International Kharkov symposium «Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves» (Kharkov, Ukraine, June 4-9, 2001)

Опубликованность результатов. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, среди которых 8 статей (3 - в научных журналах, 2 - в сборниках научных трудов, 3 - в сборнике материалов конференций), 4 - тезисов докладов. Общий объем опубликованных материалов составляет 41 страницу.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников, двух приложений. Общий объем работы составляет 94 страницы, в том числе 28 рисунков на 22 страницах, 3 таблицы на 2 страницах, 2 приложения на 6 страницах и список использованных источников, включающий 39 наименований на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Введение содержит и анализ современного состояния решаемой проблемы, исходные данные для разработки темы и обоснования необходимости выполнения работы.

Общая характеристика работы содержит обоснование актуальности темы, цели и задачи исследования, описание методологии и методов проведенного исследования, постановку целей и задач исследования, научную новизну и значимость полученных результатов. Здесь же подробно изложены защищаемые положения, указан личный вклад соискателя, апробация и опубликованность результатов, а также структура диссертации.

Первая глава содержит вывод нелинейных самосогласованных уравнений ЛБВ-О с нерегулярной спиральной замедляющей системой. Уравнения возбуждения спиральной замедляющей системы с переменным шагом получено для связанных ЕН волн в импедансном приближении с использованием локальных базисных функций сечения. Релятивистское уравнение движения крупных частиц, моделирующих электронный поток, записано в z -системе. Для учета эффектов динамического расслоения электронного потока и распределения плотности тока по сечению пучка рассматривается многослойная модель пучка. Силы пространственного заряда рассчитаны в релятивистском приближении. Введена система удобных для расчетов безразмерных переменных. Полученные нелинейные самосогласованные уравнения ЛБВ-О с нерегулярной спиральной замедляющей системой образуют замкнутую математическую мо-

дель, в которую входят лишь физически измеримые параметры, в частности, переменный по длине области взаимодействия шаг спирали замедляющей системы. Этим она отличается от ранее известных моделей, в которых используются эквивалентные параметры. Благодаря этому сформулированная математическая модель открывает широкие возможности для оптимизации спиральной ЛВВ с переменным шагом по любому критерию качества: КПД, линейности амплитудо- и фазочастотных характеристик, равномерности усиления в полосе частот и т.д.

Вторая глава посвящена исследованию нелинейных искажений в оптимизированных по КПД ЛВВ-О со спиральной нерегулярной замедляющей системой в полосе частот. В регулярных ЛВВ нелинейные искажения возрастают с улучшением группировки электронов и, соответственно, с увеличением КПД ЛВВ. В ЛВВ с оптимальным законом изменения шага спирали электронный КПД ЛВВ может превышать 70%. Естественно было бы ожидать, что в таких ЛВВ возрастают и нелинейные искажения. Однако предварительные исследования, выполненные на частоте оптимизации шага спирали ω_0 , показали, что доля высших гармонических составляющих в спектре выходного сигнала значительно (в 2-3 раза) ниже, чем в аналогичных (по основным параметрам) регулярных ЛВВ. Представляется актуальным подробное исследование этого явления в полосе частот. Дело в том, что при отстройке входного сигнала ω от ω_0 положения максимумов амплитуд высших гармоник могут перемещаться вдоль области взаимодействия, что может привести к изменению гармонического состава сигнала на выходе по сравнению с ω_0 . Для исследования этих эффектов во второй главе на основе обобщенной на случай негармонического сигнала математической модели, развитой в главе 1, разработан пакет программ, позволяющий оптимизировать закон изменения шага спирали по максимуму КПД и минимуму нелинейных искажений в полосе частот. В этой модели при одночастотном (ω) входном сигнале в установившемся режиме возбуждаемое поле в каждом сечении z представлено как сумма гармонических составляющих $m\omega$. В соответствии с общей теорией возбуждения нерегулярных волноводов, развитой в главе 1, усредненная по поперечному сечению электронного пучка продольная электрическая составляющая волнового поля (рассматриваются только попутные волны с нормальной дисперсией), представляется в виде:

$$E_{sz} = \sum_{m=1}^M E_m(z) \cdot \sqrt{\rho_{sm}(z) \cdot \cos(\max)} \cdot \int_0^z \frac{m\omega}{v_{\phi m}(z)} dz + \theta_m(z) \quad (1)$$

Здесь E_m - амплитуда, θ_m - набег фазы (горячей), определяемый полем формирующегося сгустка электронов, $v_{\phi m}(z)$ - фазовая скорость ("холодная") собственной волны на частоте $m\omega$ регулярного волновода сравнения, соответствующего сечению z нерегулярного волновода; $\rho_{sm} = R_{sm} / R_{sm}^0$; $R_{sm} = R_s(z, m\omega)$ - удельное сопротивление связи [ом·м²] собственной волны регулярного волновода сравнения в сечении z на частоте $m\omega$, $R_{sm}^0 = R_s(0, m\omega)$, $z=0$ соответствует началу области взаимодействия.

Эффективность взаимодействия оценивается величиной волнового КПД

$$\eta_m = 0.25 \varepsilon [A_m^2(T) - A_m^2(0)] \frac{R_{sm}^0}{R_{sm}^0(W)} \frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0^2}; \quad \eta = \sum_m \eta_m; \quad \gamma_0 = 1 / \sqrt{1 - \beta_0^2} \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon = \left(\frac{e I_0 R_{s0}}{2 m_0 \omega_0^2} \right)^{1/3}$ - параметр усиления на ω_0 ; I_0 - ток пучка по модулю; e , m_0 - заряд и масса покоя электрона; $R_{s0} = R_s(0, \omega_0)$ - сопротивление связи на ω_0 в начале области взаимодействия. $A_m(T)$ - безразмерная амплитуда E_m на $m\omega$, $T = z/L$, L - длина области взаимодействия. $\beta_0 = \frac{v_0}{c}$, v_0 - начальная скорость электронов.

Интенсивность возбуждения высших гармонических составляющих (ВГС) оценивается величиной коэффициента ВГС K_n . $K_n = \frac{\sum_{m=2}^M \eta_m}{\eta_1}$. Фазовая группировка электронов на $m\omega$ характеризуется функцией группировки $G_m(T)$:

$$G_{rm}(T) = \frac{1}{N} \left[\left(\sum_{i=1}^N \cos m u_i(T) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sin m u_i(T) \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

где $u_i(T)$ - относительная фаза i -й крупной частицы, $i = \overline{1, N}$.

Для сравнения полосовых характеристик регулярной и нерегулярной ЛБВ были выбраны оптимальные варианты для опорной частоты $f_0 = 3 \Gamma \Gamma \text{ц}$ с учетом возбуждения трех высших гармоник ($M=4$), $\beta_0 = 0.14$, $U_0 = 5086 \text{В}$.

Вариант 1 (регулярная): радиус спирали $R_0 = 0.22 \text{см}$, радиус пучка $r_0 = 0.18 \text{см}$, $\theta_0 = 7.52^\circ$, $\varepsilon = 0.150$, $L = 11.1 \text{см}$, $A_1(0) = 0.018$, $I_0 = 0.30 \text{А}$, $V_\phi = v_\phi(0, \omega_0)/v_0 = \text{const} = 0.856$, $\eta_\Sigma = 0.32$, $\eta_m = 0.238, 0.050, 0.017, 0.009$.

Вариант 2 (нерегулярная): $R_0 = 0.25 \text{см}$, $r_0 = 0.20 \text{см}$, $\theta_0 = 9.98^\circ$, $\varepsilon = 0.173$, $L = 12.7 \text{см}$, $A_1(0) = 0.115$, $I_0 = 0.62 \text{А}$, $V_\phi = \text{var}$, $\eta_\Sigma = 0.70$, $\eta_m = 0.632, 0.042, 0.009, 0.016$.

Параметры подобраны таким образом, чтобы длина L соответствовала первому максимуму мощности полезного сигнала.

Полосовые характеристики этих вариантов получались в виде зависимостей $\eta_m(W)$, $K_n(W)$ при фиксации всех параметров и закона $V_\phi(z)$, полученных для $W=1$ и приведенных выше. На рис.1 и рис.2 приведены полученные полосовые характеристики соответственно для регулярной и нерегулярной ЛБВ. Кривые 1-4 соответствуют $\eta_1(W) - \eta_4(W)$, кривая 5 соответствует $\eta_\Sigma(W)$, пунктирная кривая 6 отображает зависимость $K_n(W)$, кривая 7 - коэффициент усиления $K_u(W) = 20 \lg(A_1(1)/A_1(0))$.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что полоса усиления нерегулярной ЛБВ шире, чем регулярной, причем значение КПД для основного сигнала в три раза больше. Для регулярной ЛБВ характерен монотонный спад η_m от максимальных значений в центре к краям полосы. Максимум мощности m -ой гармоники смещается в область низких частот по мере увеличения номера m . В результате коэффициент нелинейных искажений K_n возрастает почти вдвое при $W=0.8$. В нерегулярной ЛБВ наблюдается колебательный характер зависимостей $\eta_m(W)$, $m \geq 2$. В результате, на значительном участке $0.8 \leq W \leq 1.5$ величина K_n совершает незначительные колебания возле значения $K_n \approx 0.15$. Только на низкочастотном краю полосы усиления наблюдается быстрое монотонное увеличение K_n и резкое снижение мощности полезного сигнала. При этом величина η_2 возрастает и даже превосходит η_1 . Причину возрастания K_n на

При этом величина η_2 возрастает и даже превосходит η_1 . Причину возрастания K_n на левом краю полосы усиления объясняет характер зависимости $R_{cm}(W)$. Параметры спирали у обоих вариантов подобраны таким образом, что эти зависимости практически одинаковы. При $W > 1$ сопротивление связи основной гармоники остается на одном уровне, а сопротивление связи паразитных гармоник монотонно понижаются.

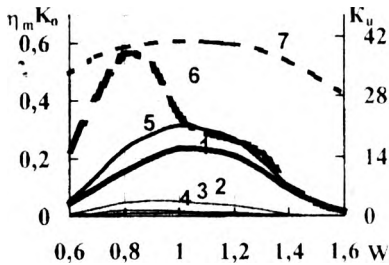


рис.1

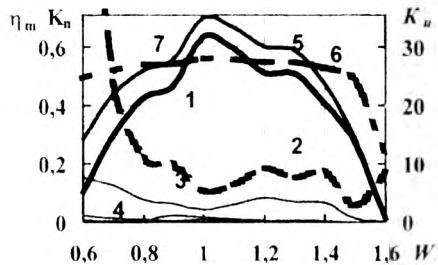


рис.2

Этим объясняется уменьшение K_n на высокочастотном краю полосы. Иная картина при $W < 1$. Здесь с убыванием W сопротивление связи основной гармоники убывает, а высших возрастает и даже превосходит R_{cm} . В результате K_n возрастает. Однако, если в нерегулярной ЛБВ K_n монотонно возрастает вплоть до W , при котором η падает почти до нуля, то в регулярной K_n достигает максимального значения, после которого монотонно уменьшается. Анализ $\rho_m(T)$ для нерегулярной ЛБВ показывает, что изменение шага спирали обеспечивает в конце ЛБВ, где осуществляется основное преобразование энергии электронного пучка в энергию волны, увеличение сопротивления связи основной волны и одновременное уменьшение его для гармоник. При $W > 1$ разница сопротивлений связи основной и высших гармоник меняется слабо. При уменьшении же $W < 1$ эта разница резко возрастает, сопротивление связи основной волны в конце ЛБВ превосходит сопротивление высших гармоник. Этим эффектом объясняется стабилизация величины K_n при $0,7 \leq W \leq 1$ в нерегулярной ЛБВ.

На основании выполненных расчетов можно сделать вывод, что в нерегулярной спиральной ЛБВ в полосе частот возбуждение ВЧ подавляется в 2-5 раза эффективней по сравнению с регулярной благодаря характеру дисперсионной зависимости $\rho_m(T)$ нерегулярной спиральной ЗС.

В третьей главе приведены результаты исследования оптимальных по КПД ЛБВ с катодной модуляцией.

Здесь на основе компьютерного моделирования выявлены основные закономерности процесса усиления в ЛБВ с катодной модуляцией электронного потока (ЛБВКМ) и с нерегулярной спиральной замедляющей системой. В исследованиях использовалась нелинейная модель ЛБВ-О, сформулированная во второй главе с необходимой коррекцией, связанной с катодной модуляцией тока сигналом. Для учета этой модуляции при использовании метода крупных частиц каждой i -й частице, влетающей в ЗС в момент t_0 , приписывается вес $i_i = I(t_0)/I_0$, I_0 - среднее значение тока за период входного сигнала. Значения i_i рассчитывались на основе вольт-амперной характеристики Фаулера-Нордгейма. Начальные скорости электронов определялись со-

отношением $v(\omega_{0i}) = \sqrt{2 \frac{e}{m_0} (u_0 + u_c \sin(\omega_{0i}))}$, u_0 - напряжение сетки, u_c - напря-

жение сигнала. Необходимая для расчета мощности входного сигнала удельная емкость сетка-катод определялась по данным измерений экспериментальных матриц автотормозных катодов гексагональной структуры, полученных в БГУИР.

Все расчеты производились для цилиндрического электронного пучка с $U_K = 100B$, $U_0 = 5000B$, $U_c = var$. Для сравнения полосовых характеристик регулярной и нерегулярной ЛБВ с модуляцией тока эмиссии сигналом выбраны три оптимальных варианта для опорной частоты $f_0 = 3ГГц$ с учетом возбуждения трех высших гармоник ($M=4$).

Вариант 1 (регулярная ЛБВКМ): $R_0 = 0.22см$, $r_0 = 0.18см$, $\varepsilon = 0.238$, $L = 7.20см$, $I_0 = 0.97A$, $V_\phi = const = 0.793$, $\eta_\Sigma = 0.34$, $\eta_m = 0.266, 0.049, 0.018, 0.008$, $R_{sm1} = 1, 0.751, 0.506, 0.366$, $K_n = 0.283$, $K_L = 24.08$, $U_S = 0.8$. Вариант 2 (нерегулярная ЛБВКМ): $R_0 = 0.25см$, $r_0 = 0.20см$, $\varepsilon = 0.182$, $L = 12.9см$, $I_0 = 0.64A$, $V_\phi = var$, $\eta_\Sigma = 0.65$, $\eta_m = 0.605, 0.009, 0.013, 0.023$, $R_{sm1} = 1, 0.787, 0.514, 0.358$, $K_n = 0.073$, $K_L = 32.97$, $U_S = 0.8$. Вариант 3 (нерегулярная ЛБВКМ): $R_0 = 0.3см$, $r_0 = 0.15см$, $\varepsilon = 0.171$, $L = 13.5см$, $I_0 = 1.00A$, $V_\phi = var$, $\eta_\Sigma = 0.587$, $\eta_m = 0.576, 0.009, 0.002, 0.001$, $R_{sm1} = 1, 0.342, 0.084, 0.021, 0.032$, $K_L = 32.34$, $U_S = 0.8$.

Данные расчетов показывают, что при изменении U_S от 0.1 до 1.0 величины η_i и K_n при оптимизации параметров изменяются вблизи некоторых средних значений. При этом величина коэффициента усиления K_L тем выше, чем ниже значение U_S . Ниже приведены примеры распределения КПД основной и высших гармонических составляющих при амплитудах модуляций $U_S = 0.2$ и $U_S = 0.8$ для каждого из вариантов.

Вариант 1 - $U_S = 0.2$, $\eta_\Sigma = 0.342$, $\eta_m = 0.266, 0.049, 0.0184, 0.008$

$U_S = 0.8$, $\eta_\Sigma = 0.294$, $\eta_m = 0.229, 0.044, 0.014, 0.007$

вариант 2 - $U_S = 0.2$, $\eta_\Sigma = 0.618$, $\eta_m = 0.601, 0.003, 0.008, 0.005$

$U_S = 0.8$, $\eta_\Sigma = 0.709$, $\eta_m = 0.647, 0.039, 0.022, 0.001$

вариант 3 - $U_S = 0.2$, $\eta_\Sigma = 0.606$, $\eta_m = 0.594, 0.0103, 0.001, 0.000$

$U_S = 0.8$, $\eta_\Sigma = 0.637$, $\eta_m = 0.630, 0.005, 0.002, 0.000$

При сравнении этих данных с результатами, полученными для аналогичных обычных ЛБВ видно, что мощность основной гармоники ЛБВКМ практически равна мощности основной гармоники в обычной ЛБВ, а коэффициент нелинейных искажений у ЛБВКМ K_n в среднем, в 1.5 раза ниже. При этом для варианта 2 при малых значениях U_S коэффициент нелинейных искажений ниже, чем у аналогичной обычной ЛБВ, в 3-4 раза. Амплитудные характеристики ЛБВКМ аналогичны амплитудным характеристикам обычных ЛБВ. Анализ полосовых характеристик показывает, что полоса усиления нерегулярных ЛБВКМ такая же, как и у регулярной. При этом величина КПД для основного сигнала в 2 раза выше, чем значение КПД регулярной. Для регулярной ЛБВКМ характерен монотонный спад η_m на краях полосы, так же как и для обычной регулярной ЛБВ. Резкое возрастание K_n в области низких частот наблюдается при $W = 0.7$, для обычной регулярной ЛБВ - при $W = 0.8$.

Полученные данные указывают на несомненные преимущества ЛБВКМ по сравнению с обычной ЛБВ. Использование катодной модуляции позволяет существенно уменьшить величину K_n при сохранении полосы усиления.

Дополнительным преимуществом ЛБВ с катодной модуляцией представляется возможность перенести локальный поглотитель, предотвращающий генерацию на отражениях, из области взаимодействия на вход замедляющей системы ЛБВ.

В четвертой главе сформулированы общие уравнения возбуждения продольно-нерегулярного гофрированного волновода произвольной системой негармонических сторонних источников, заданных сторонней плотностью электрических токов $\vec{j}(\vec{r}, t)$ при условии, что потери в стенках волновода игнорируются. При выводе уравнений возбуждения использованы метод преобразования координат (используются неортогональные координаты) и проекционный метод для определения комплексных амплитуд возбужденных волн.

В уравнениях возбуждения разделены динамические поля (поля с запаздыванием) и квазистатические поля источников, что обеспечивает равномерную сходимость рядов, представляющих динамическую часть поля.

В пятой главе сформулированы самосогласованные нелинейные одномерные уравнения релятивистской ЛБВ-О с замедляющей системой в виде произвольно-нерегулярного волновода с учетом произвольного числа гармонических составляющих сигнала и усредненных сил взаимодействия электронов. Оценено влияние второй гармоники сигнала в оптимизированных по КПД ЛБВ-О. Исследованы их полосовые характеристики. Система самосогласованных нелинейных уравнений ЛБВ-О с рабочим типом E_{0j} нерегулярного гофрированного волновода с учетом высших гармонических составляющих сигнала на модах E_{in} ($i=1, 2, \dots$) имеет вид:

$$C_{mj} = \frac{-V_{mj}}{W^2 \cdot m^2 \cdot v_{0j} \cdot g^2} \cdot \left(\frac{v_{0j}}{v_{0j}} \right)^2 + \frac{1}{L_0 \cdot g} \cdot \frac{dg}{dT} \left(-\frac{A_{mj}}{v_{0j}} + \sum_{k \neq j} \frac{2 \cdot v_{0j}}{v_{0k}^2 - v_{0j}^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0j})} A_{mk} \right) -$$

$$- \frac{j \cdot \sigma}{W \cdot m \cdot e_{0jj} \cdot \pi \cdot v_{0j}^2 \cdot g^2} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J_0 \left(\frac{v_{0j}}{v_{0j}} \cdot \frac{r_0}{g} \right) \cdot e^{-j m \omega t},$$

$$\frac{dA_{mj}}{dT} = L_0 \cdot \left(\dot{W} \cdot V_{mj} + v_{0j} \cdot \dot{C}_{mj} \right);$$

$$\frac{dV_{mj}}{dT} = -W^2 \cdot m^2 \cdot L_0 \cdot A_{mj} -$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{W^2 \cdot m^2}{L_0} \cdot v_{0l}^2 \cdot \left(\frac{dg}{dT} \right)^2 \cdot \left[A_{mj} \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(1 + \frac{4}{v_{0l}^2} \right) + \sum_{k \neq j} \frac{4 \cdot (v_{0j}^2 + v_{0k}^2)}{(v_{0j}^2 - v_{0k}^2)^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0j})} \cdot A_{mk} \right] + \\
& + W^2 \cdot m^2 \cdot v_{0l}^2 \cdot g \cdot \frac{dg}{dT} \cdot \left(- \frac{C_{mj}}{v_{0l}} + \sum_{k \neq j} \frac{2 \cdot v_{0j}}{v_{0k}^2 - v_{0j}^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0j})} \cdot C_{mk} \right) - \\
& - \frac{W \cdot m \cdot j \cdot \sigma}{\varepsilon_{0ij} \cdot \pi \cdot g} \cdot \frac{dg}{dT} \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{r_0}{v_{0l} \cdot g} \cdot J_1 \left(\frac{v_{0l}}{v_{0l}} \cdot \frac{r_0}{g} \right) \cdot e^{-j m \omega_i}; \\
\frac{d\beta_i}{dT} = & - \frac{L_0 \cdot R^3}{\beta_i} \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^G J_0 \left(\frac{r_0}{g} \cdot \frac{v_{0l}}{v_{0l}} \right) \cdot C_{mj} \cdot e^{j m \omega_i} + \frac{r_0}{L_0 \cdot v_{0l} \cdot g^2} \cdot \right. \\
& \left. \cdot \frac{dg}{dT} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^G J_1 \left(\frac{v_{0l}}{v_{0l}} \cdot \frac{r_0}{g} \right) \cdot A_{mj} \cdot e^{j m \omega_i} - S_q \cdot F_{qi} \right\}; \\
\frac{d\omega_i}{dT} = & - \frac{W \cdot L_0}{\beta_i}
\end{aligned} \tag{4}$$

Начальные условия к системе (4) имеют вид: $\beta_i(0) = \beta_0$, $\omega_i(0) = 2\pi i/N$.

$$\frac{dg}{dt}(0) = 0, \operatorname{Re} A_{1l}(0) = \left[K_0 \cdot \frac{(1 - R_0) \cdot \sigma \cdot \chi}{W \cdot R_0 \cdot \pi \cdot e_{01l}} \right]^{1/2}, \operatorname{Im} A_{1l}(0) = 0,$$

$$\operatorname{Re} V_{1l}(0) = 0, \operatorname{Im} V_{1l}(0) = -W^2 \cdot \chi \cdot \operatorname{Re} A_{1l}(0), \chi = \sqrt{W^2 - g_0^2}$$

$$g_0 = g(0), C_{1l}(0) = -\frac{g_0}{v_{0l}} \cdot V_{1l}(0), V_{mj}(0) = A_{1l}(0) = 0 \tag{5}$$

В (4), (5) приняты следующие обозначения: $T = Z/L$, L - длина области взаимодействия, $L_0 = k_0 L$, $k_0 = \omega_0/c$, $W = \omega/\omega_0$, $g = k_0 b(T)/v_{0l}$, $b(T)$ - внутренний радиус волновода, $r_0 = k_0 r$, r - радиус трубчатого электронного потока.

$A_{mj} = E_{rmj} \cdot e / m_0 \cdot c^2$, e , m_0 - заряд и масса покоя электрона, c - скорость света в вакууме, $C_{mj} = E_{zmj} \cdot e / \omega_0 \cdot m_0 \cdot c$, $\sigma = \frac{e \cdot \mu_0}{m_0 \cdot c} \cdot |I_0| = 0,73 \cdot 10^{-3} \cdot I_0$

$|I_0|$ - ток пучка $b \cdot A$, $\beta = v/c$, v - скорость i -го электрона, $R_i = \sqrt{(1 - \beta_i^2)}$,

$K_0 = P_{\text{вх}}/P_0$, $P_{\text{вх}}$ - мощность входного сигнала, $P_0 = V_{0l} |I_0|$, $e_{0ij} = \frac{1}{2} \cdot J_i^2(v_{0j})$,

$S_q \cdot F_{qi}$ - параметр и силовая составляющая пространственного заряда:

$$S_a = 3,517 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{|I_0|}{\beta_0 \cdot r_0};$$

$$F_{\eta} = \frac{1}{Ne} \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{\Delta^2}{(\omega \cdot t_i - \omega \cdot t_j)^2 \cdot \left[(\omega \cdot t_i - \omega \cdot t_j)^2 + \Delta^2 \right]}; \Delta = 2 \cdot (v_{01} \cdot (g_0 + 0.5 \cdot g_1) - r_0) \cdot W / \beta_0$$

Профиль волновода задается в виде: $g(T) = g_0 + g_1 \cdot \sin^2(h \cdot T - A_3 \cdot T^3 + A_5 \cdot T^5)$

$$\text{Общий электронный КПД определяется как: } \eta_e(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1 - R_0 / R_i(T)}{1 - R_0}$$

Волновой КПД на моде E_{mj} и гармонике m рассчитывается по формуле:

$$\eta_{mj}(T) = \frac{m \cdot W \cdot \pi \cdot R_0 \cdot e_{0ij}}{(1 - R_0) \cdot \sigma} \cdot \ln \left[\frac{A_{mj}(T) V_{mj}^*(T) - A_{mj}(0) V_{mj}^*(0)}{1} \right]$$

$$\text{Погрешность расчетов определяет дисбаланс КПД } \Delta: \Delta = \eta_e(T) - \sum_{m,j} \eta_{mj}(T)$$

$$\text{Коэффициент усиления по мощности: } K_u = 10 \cdot \lg \left(1 + \eta_{11}^{(1)} / K_0 \right).$$

С использованием описанной модели получены и исследованы оптимизированные по КПД варианты регулярных и нерегулярных ЛБВ на гофрированном волноводе в диапазоне $\beta_0 = 0.25 \div 0.9$. Основное внимание уделялось влиянию полей на второй гармонике сигнала. Установлено, что из-за достаточно большой дисперсии в гофрированном волноводе (в отличие от спиральной замедляющей системы) волны на второй гармонике сигнала имеют незначительную амплитуду и практически не влияют на процесс взаимодействия. И это несмотря на то, что вторая гармоника тока в электронном потоке по величине сравнима с первой гармоникой.

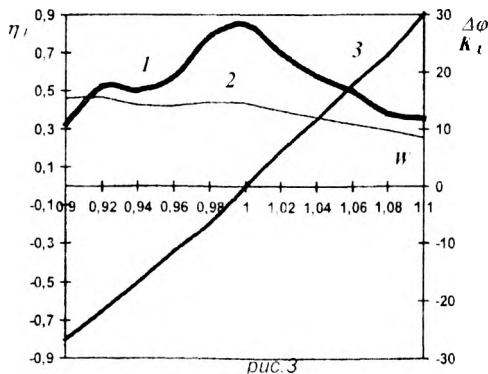


рис.3

Среди полученных оптимизированных вариантов наиболее интересен вариант релятивистской нерегулярной ЛБВ с электронным КПД 85%: $\beta_0 = 0.902$, $L_0 = 337$, $r_0 = 2.4$, $n = 146$, $K_n^* = 0.005$, $I_0 = 6.4A$, $g_0 = 1.13$, $g_{10} = \text{const} = 0.511$, $A_3 = 196.5$, $A_5 = 27.81$, $\eta_1 = 0.851$, $K_1 = 14.458$ дБ.

Одновременно исследовались частотные характеристики оптимизиро-

ванных вариантов: $K_u(W)$, $\eta_1(W)$, $A\varphi(W)$, $\Delta\varphi$ - набег фазы сигнала при W относительно $W=1$.

Все они имеют однолинейный характер, кроме тех случаев, когда в полосе усиления варианта оказывается частота резонанса канавки гофрированного волновода (в этом случае нарушается линейность фазочастотной характеристики $A\varphi(W)$). Полоса по

уровню половинной мощности для всех 9 исследованных вариантов составляет 15-17%. Полосовые характеристики приведенного выше варианта представлены на рис.3 (1- $\eta_i(W)$, 2- $K_n(W)$, 3- $\Delta\varphi(W)$, $\Delta\varphi$ -фазочастотная характеристика).

В шестой главе исследованы нелинейные процессы многочастотной фазовой группировки электронов в ЛБВ-О с замедляющей системой в виде гофрированного волновода. Многочастотному режиму ЛБВ посвящено небольшое число работ, однако в них отсутствует анализ физических явлений нелинейного взаимодействия сигналов, в частности, формирования фазовых электронных сгустков, их формы и динамики вдоль области взаимодействия. Такое исследование на основе строгой электродинамической модели выполнено в данной главе. Математическая модель ЛБВ на гофрированном волноводе в многочастотном режиме базируется на общих уравнениях возбуждения произвольно перегулянного волновода негармоническими источниками, полученных в главе 4, и методе фундаментальной частоты. В соответствии с этим методом все спектральные составляющие входного сигнала, а также продукты их нелинейного взаимодействия эквидистантны и рассматриваются как гармоники «фундаментальной частоты» Ω , т.е. $\omega_n = n\Omega$.

На основе этой модели были проведены подробные исследования оптимальных многочастотных режимов ЛБВ с регулярной замедляющей системой при $\beta_0 \approx 0.25 \pm 0.9$, $I_0 = 2A$. Исследовались двух-, трех-, четырех- и пятичастотные режимы усиления ЛБВ. Было установлено, что процесс взаимодействия сигналов имеет многокомпонентный характер, на который влияет большой ряд факторов, вступающих в действие еще на линейном этапе взаимодействия. Впервые изучены процессы формирования фазового сгустка электронов и его спектральный состав на различных этапах взаимодействия в многочастотных режимах ЛБВ. Ниже, для иллюстрации некоторых особенностей многочастотного взаимодействия приведен следующий пример.

Регулярная ЛБВ: ($A_3 = A_5 = 0$), двухчастотный входной сигнал ($m_1 = 19$, $m_2 = n = 20$), $\beta_0 = 0.2595$, $I_0 = 2A$, число периодов гофра $nv = 54$, $L_n = 30.73$, $r_0 = 1.45$, $g_0 = 1.139$, $g_{10} = 0.784$, $K_{19} = K_{20} = 0.00057$, $N = 240$ - количество крупных частиц.

На рис. 4.1 а, б, в, г изображены зависимости плотности тока пучка от полной фазы фундаментальной частоты $\Phi - \Omega t$, соответственно в сечениях $T = 0.15, 0.4, 0.7, 1.0$. На рис. 4.2 а, б, в, г в тех же сечениях приведены спектры гармоник тока в электронном пучке. Сечение $T = 0.15$ соответствует почти линейному режиму: здесь, как видно из рис. 4.1а, за счет интерференции сигналов при равенстве их входных амплитуд имеет место сильная амплитудная модуляция плотности тока сгустков; число сгустков соответствует низкой частоте - их 19. Спектр тока (рис. 4.2а) еще не содержит интермодуляционных составляющих, появились лишь слабо выраженные гармоники сигналов. В сечении $T = 0.4$ нелинейность процесса взаимодействия уже существенна: модуляция плотности тока негармонична (рис. 4.1б), появились интермодуляционные составляющие, гармоника тока на низкой частоте заметно выше (рис. 4.2б). В сечении $T = 0.7$ заметны процессы расщепления и фазовой модуляции сгустков: их расположение по Φ неэквидистантно, число сгустков возросло (рис. 4.1в), появляются сильные интермодуляционные составляющие практически во всем спектре $m = 1 \pm 50$, верхняя частота ($m = 20$) превалирует. В сечении $T = 1.0$ процессы расщепления и фазовой модуляции сгустков выражены еще более отчетливо, число сгустков значительно возросло (рис. 6.1в), интермодуляционные составляющие практически во всем спектре

$m=1 \div 50$ усилились, верхняя частота ($m=20$) превалирует. При этом величина гармоник в области частот $m=40$, по сравнению с сечением $T=0.7$, незначительно уменьшилась.

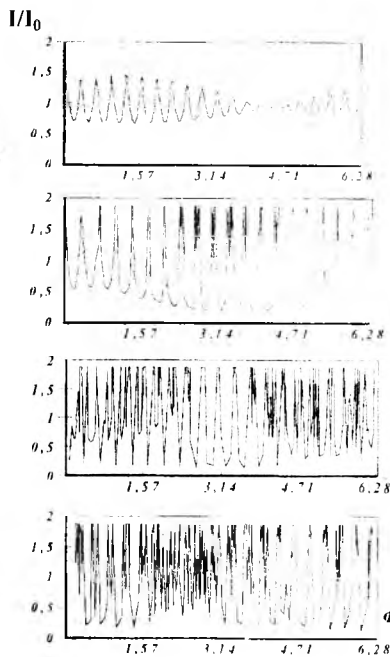


рис.4.1

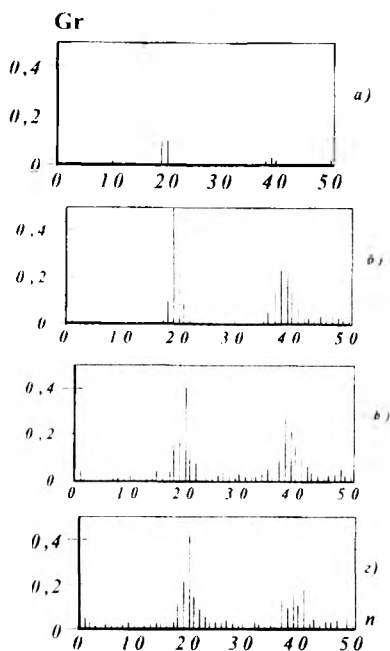


рис.4.2

Проведенные исследования указывают на то, что нелинейные многочастотные режимы ЛБВ сопровождаются более сложными процессами, чем это описано в литературе на базе упрощенных моделей.

В Приложении приведены результаты сравнения принципиальных положений и прогнозов развитой в работе теории и проведенных на ее основе исследований и оптимизационных расчетов.

1. Проведено сравнение экспериментально замеренных дисперсионных характеристик волн E_{01} для синусоидального регулярного гофрированного волновода, известных по публикациям, с расчетными данными, полученным по моделям глав 4.5. Максимальное расхождение экспериментальных и расчетных дисперсионных характеристик вблизи критической частоты составляет 1,5%, в остальном диапазоне имеет место практически точное совпадение.

2. По моделям глав 4.5 рассчитаны оптимальные параметры конструкций ЛБВ-О в диапазоне $\lambda=8$ мм с $V_0=16$ кВ и $I_0=2.4$ со следующими расчетными параметрами: а) регулярная ЛБВ-О и б) ЛБВ-О с оптимизированным профилем нерегулярного гофра. Макеты регулярной и нерегулярной ЛБВ-О с полученными в расчет параметрами были спроектированы, изготовлены и испытаны в ИРЭ им. Усикова НАН Украины под руководством ведущего специалиста ИРЭ В.Д. Еремки. При испытаниях установлено, что ЛБВ с оптимизированным профилем замедляющей системы имела в 2,4 раза более высокий КПД (28%), чем регулярная ЛБВ. Эти экспериментальные результаты

подтверждают, что оптимизация профиля нерегулярной электродинамической системы действительно приводит к существенному повышению КПД ЛБВ-О при незначительном снижении полосы усиления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе теоретических исследований и вычислительного эксперимента автором получены следующие результаты:

1. Развита нелинейная теория ЛБВ-О с нерегулярной спиральной замедляющей системой в многочастотном режиме [5, 6].
2. Доказана возможность значительного снижения коэффициента нелинейных искажений в режиме высоких КПД за счет оптимизации распределения наливки спирали вдоль области взаимодействия ЛБВ [5].
3. Сформулирована математическая модель нерегулярной ЛБВ с катодной модуляцией (ЛБВКМ) и с ее использованием показано, что в регулярных и нерегулярных ЛБВКМ можно значительно понизить коэффициент нелинейных искажений в полосе усиления по сравнению с аналогичными по параметрам традиционными ЛБВ [1, 2, 6, 10].
4. Развита электродинамическая теория релятивистской ЛБВ-О на нерегулярном гофрированном волноводе с учетом возбуждения высших гармонических составляющих на основной (E_{01}) и высших модах (E_{0n}) волновода [2, 7, 8, 9, 12].
5. Найдены оптимальные по КПД варианты ЛБВ-О сверхбольшой мощности в широком диапазоне параметров [7, 9].
6. Впервые выявлены явления, сопровождающие фазовую группировку электронов в двухчастотном режиме: амплитудная модуляция сгустков на начальном участке, фазовая модуляция и расщепление сгустков в области насыщения [3, 8, 11].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах и сборниках

1. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Силицын А.К. Исследование оптимальных вариантов ЛБВ с катодной модуляцией // 9-я международная Крымская микроволновая конференция. КрыМиКо'99: Сб.трудов, Севастополь, 13-16 сент. 1999 г. / Севастопольский государственный технический университет. -Севастополь, Украина, 1999.- С.127-128.
2. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Силицын А.К. Оптимизированные ЛБВ с катодной модуляцией. // Радиотехника и электроника: Республиканский межведомственный сборник научных трудов / БГУИР.- Минск, 1999.- Вып. 24.- С.161-164.
3. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Силицын А.К. Оптимизация по КПД релятивистской ЛБВ на нерегулярном гофрированном волноводе с учётом высших гармонических составляющих // 10-я международная Крымская микроволновая конференция. КрыМиКо'2000: Сб.трудов, Севастополь, 11-15 сент. 2000г. / Севастопольский государственный технический университет.- Севастополь, Украина, 2000.- С.52-53
4. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Попова Г.Л., Силицын А.К. Нелинейные процессы взаимодействия двух сигналов в ЛБВ с замедляющей системой в виде гофрированного волновода // 10-я международная Крымская микроволновая конференция,

КрыМиКо'2000: Сблрудов. Севастополь, 11-15 сент. 2000г. / Севастопольский государственный технический университет. - Севастополь, Украина, 2000.- С.183-184.

5. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Синицын А.К. Возбуждение высших гармонических составляющих в нерегулярной ЛБВ-О в полосе частот // Электромагнитные волны & электронные системы.- 2000. - Т.5, № 4. - С. 34-39.
6. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Синицын А.К. Исследование оптимальных режимов ЛБВ с модуляцией сигналом тока эмиссии катода // Радиотехника и электроника.- 2000. - Т.45, № 12.- С.1493-1498.
7. Гуринович А.Б., Кураев А.А., Синицын А.К. Электродинамическая теория ЛБВ-О на гофрированном волноводе с учетом высших гармонических составляющих сигнала // Электромагнитные волны & электронные системы. -2000.- Т.5, № 6.- С. 11-16.
8. Гуринович А.Б. Многочастотный нелинейный режим ЛБВ с замедляющей системой в виде гофрированного волновода // Радиотехника и электроника: Республиканский межведомственный сборник научных трудов / БГУИР.- Минск, 2000 - Вып. 24.- С.161-164.

Тезисы докладов конференций

9. Gourinovitch A.B., Kurayev A.A., Popkova T.L., Sinitsyn A.K. Relativistic TWT on the First Spatial Harmonic with Efficiency 85% // International Vacuum Electronics Conference 2000, Monterey, 2-4 may, 2000 / IEEE Electron Devices Society.- Monterey, USA, 2000.- P. 1.14.
10. Gourinovitch A.B., Kurayev A.A., Popkova T.L., Sinitsyn A.K. Optimized TWT with the Cathode Modulation // International Vacuum Electronics Conference 2000, Monterey, 2-4 may, 2000 / IEEE Electron Devices Society.- Monterey, USA, 2000.- P. 1.22.
11. Gourinovitch A.B., Eremka V.D., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. Nonlinear multity-frequency bunching in regular and irregular relativistic TWT // MSMW2001' Fourth International Kharkov symposium «Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves»: Тезисы докладов. Харьков, 4-9 июня 2001 / Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine.- Kharkov, Ukraine, 2001. - P. 283-285.
12. Gourinovitch A.B., Eremka V.D., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. Nonlinear Theory of relativistic TWT with Slowing System in Form of Arbitrary Irregular Waveguide // Fourth International Kharkov symposium «Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves»: Тезисы докладов. Харьков, 4-9 июня 2001 / Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine.- Kharkov, Ukraine, 2001. - P. 255-257.



Гурыновіч Аляўціна Барысаўна

НЕЛІНЕЙНАЯ ТЭОРЫЯ І АПТЫМІЗАЦЫЯ ЧАРАНКОЎСКІХ УЗМАЦНЯЛЬНІКАЎ З НЕРЭГУЛЯРНЫМІ ЭЛЕКТРАДЫНАМІЧНЫМІ СІСТЭМАМІ

Ключавыя словы: ЗВЧ, лямпа бягучай хвалі (ЛБХ), лямпа бягучай хвалі з катоднай мадуляцыяй (ЛБХКМ), запавольніваючая сістэма (ЗС), рэлятывісцкі паток, прасторавы зарад, аптымізацыя, аптымальны профіль, каэфіцыент карыснага дзеяння (ККД), катод Спіндта, гафрыраваны хвалявод, вялікія магутнасці, нелінейная тэорыя, шматчастотны рэжым амплітудна-фазачастотная характарыстыка, шматчастотная групіроўка.

Прадмет даследавання: нелінейны працэс ўзаемадзеяння магутных электронных патокаў (уклучаючы рэлятывісцкія) з паямі нерэгулярных электрадынамічных сістэм у чаранкоўскіх узмацняльнікаў тыпа «О», уключаючы ў сабе розныя нелінейныя аспекты ўзаемадзеяння: эфектыўнасць, узмацненне сігналу, фазавая групіроўка электронаў, нелінейныя скажэнні, нелінейнае ўзаемадзеянне сігналаў, інтэрмадуляцыю і іхні ўклад у фарміраванне амплітудна-фазачастотных характарыстык узмацняльніка.

Мэта работы: развіццё нелінейнай тэорыі чаранкоўскіх узмацняльнікаў О-тыпа: ЛБХ-О з спіральнай запавольніваючай сістэмай сярэдняй магутнасці і рэлятывісцкіх ЛБХ-О з запавольніваючай сістэмай у выглядзе гафрыраванага хвалявода высокай і звышвысокай магутнасці ў выпадку адвольна-перэгулярнай запавольніваючай сістэмы, шматчастотнага і шматмодовага ўздзеяння; фармулёўка на аснове гэтай тэорыі нелінейнай мадэлі ЛБХ-О, выкарыстанне яе для аптымізацыі характарыстык ЛБХ-О, даследаванняў асаблівасцей аптымальных працэсаў у чаранкоўскіх узмацняльніках.

Метад даследавання: пераўтварэнне метрычнай прасторы, практычны метады, метады самаузгодненнага поля; дзея пашуку аптымальных варыантаў выкарыстання варыяцыйна-гэрацыённага метаду рашэння задач аптымальнага кіравання.

Вынікі працы: распрацаваны мадэлі і праграмае забеспячэнне дзеля разліку і аптымізацыі выхадных узмацняльнікаў бягучай хвалі (УБХ) для інфармацыйных сістэм наземнай і спадарожнікавай сувязі: ЛБХ-О з спіральнай запавольніваючай сістэмай, ЛБХ-О з катоднай мадуляцыяй, ЛБХ-О з запавольніваючай сістэмай на гафрыраваным хваляводзе. Атрыманы ураўненні узбуджэння хваляў паддоўжна-перэгулярных на аснове метаду пераўтварэння каардынат і практычнага метаду Галёркіна, ураўненні Максвелла ў пераўтварэнай да рэгулярнага цыліндрычнага хвалявода адзінкавага радыуса неартаганальнай сістэме каардынат, а таксама самаузгоднення ўраўнення руху электронаў у ўзбуджаным хвалявым поле ўзмончанага шматчастотнага сігналу. Атрыманы і даследаваны паласавыя і амплітудныя характарыстыкі аптымізаваных варыантаў азначаных выпэй тыпаў ЛБХ-О.

Атрыманыя вынікі ўказваюць шляхі істотнага паліпшэння характарыстык як у традыцыйных узмацняльніках О-тыпу, так і узмацняльнікаў на падставе прыняцыйна новых канструктыўных рашэнняў.

Гуринович Алевтина Борисовна

НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЧЕРЕНКОВСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ С НЕРЕГУЛЯРНЫМИ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Ключевые слова: СВЧ, лампа бегущей волны (ЛБВ), лампа бегущей волны с катодной модуляцией (ЛБВКМ), замедляющая система (ЗС), релятивистский поток, пространственный заряд, оптимизация, оптимальный профиль, КПД, катод Спиндта, гофрированный волновод, большие мощности, нелинейная теория, многочастотный режим, амплитудно-фазочастотная характеристика, многочастотное группирование.

Предмет исследования: нелинейный процесс взаимодействия мощных электронных потоков (включая релятивистские) с полями нерегулярных электродинамических систем в черенковских усилителях типа «О», включающий в себя различные нелинейные аспекты взаимодействия: эффективность, усиление сигнала, фазовое группирование электронов, нелинейные искажения, нелинейное взаимодействие сигналов, интермодуляцию и их вклад в формирование амплитудно-фазочастотных характеристик усилителя.

Цель работы: развитие нелинейной теории черенковских усилителей О-типа: ЛБВ-О со спиральной замедляющей системой средней мощности и релятивистских ЛБВ-О с замедляющей системой в виде гофрированного волновода высокой и сверхбольшой мощности на случай произвольно-нерегулярной замедляющей системы, многочастотного и многомодового взаимодействия; формулировка на основе этой теории нелинейной модели ЛБВ-О, использование ее для оптимизации характеристик ЛБВ-О, исследования особенностей оптимальных процессов в черенковских усилителях.

Метод исследования: преобразование метрики пространства, проекционный метод, метод самосогласованного поля; для поиска оптимальных вариантов применен вариационно-итерационный метод решения задач оптимального управления.

Результаты работы: разработаны модели и программное обеспечение для расчета и оптимизации выходных усилителей бегущей волны (УБВ) для информационных систем наземной и спутниковой связи: ЛБВ-О со спиральной замедляющей системой, ЛБВ-О с катодной модуляцией, ЛБВ-О с замедляющей системой на гофрированном волноводе. Получены уравнения возбуждения волн продольно-нерегулярных волноводов на основе метода преобразования координат и проекционного метода Галёркина, уравнения Максвелла в преобразованной к регулярному цилиндрическому волноводу единичного радиуса в неортогональной системе координат, а также самосогласованные уравнения движения электронов в возбуждаемом волновом поле усиливаемого многочастотного сигнала. Получены и исследованы полосовые и амплитудные характеристики оптимизированных вариантов указанных выше типов ЛБВ-О.

Полученные результаты указывают пути существенного улучшения характеристик как традиционных усилителей О-типа, так и усилителей на основе принципиально новых конструктивных решений.

SUMMARY

Gourinovitch Alevtina Borisovna

NONLINEAR THEORY AND OPTIMIZATION THE CHERENKOV'S
AMPLIFICATIONS WITH THE IRREGULAR ELECTRODYNAMIC SYSTEMS

Key words: UHF, traveling-wave tube (TWT), wave-wave tube with the cathode modulation (TWTCM), the slowing system (SS), the relativistic electron beam, space charge, the optimization, the optimal profile, efficiency factor, the Spindt's cathode, the corrugated waveguide, the high powers, the nonlinear theory, the multifrequency regime, the amplitude-phase-frequency response, the multifrequency bunching.

Subject of investigation: the nonlinear process of interaction of the power electron beams (including the relativistic ones) with fields of the irregular electrodynamic systems in the type «O», cherenkov's amplifier, including the different nonlinear aspects of interaction: efficiency, amplification of signal, the phase bunching of the electrons, the nonlinear distortions, the nonlinear interaction of signals, intermodulation and and their contribution to the amplitude-phase-frequency responses of amplifier.

Goal of the work: the extending of the nonlinear theory of the type «O» cherenkov's amplifier: TWT-O with the helix slowing system of the middle power and the relativistic TWT-O with the corrugated waveguide slowing system of the high and super high power at case of the arbitrary-irregular slowing system, the manyfrequency and manymode interaction; formulation on base of this theory the nonlinear model TWT-O, using one for optimization of the TWT-O parameters, the investigations of peculiarities of the optimized processes in the cherenkov's amplifications.

Method of investigation: the metrical space transformation, the projection method, the self-consistent field method; the variational-iterational method for decision of the optimal control problems have been used for search of the optimal variants.

Results of work: the models and software for calculation and optimization of the output wave amplification for the information systems of the ground and satellite relation were been worked out: TWT-O with the helix slowing system, the TWT-O with the cathode modulation, the TWT-O with the corrugated waveguide slowing system.

It has been obtained the excitation equations for the longitudinally-irregular corrugated waveguide on the base of the coordinates transformation method and the projection Galerkin's method, the Maxsvell's equations in the transformed to the regular cylindrical waveguide one-radius in non-orthogonal coordinate system, and the self-consistent equations of the electrons movement in the excited wave fields of the amplified manyfrequency signal.

It has been obtained and has been investigated the bandwidth and amplitude characteristics of the mentioned above optimized variants of the TWT-O.

The obtained results indicates the directions of the essential improvement of the amplifiers characteristics both in the traditional amplifiers, and amplifiers on the base of the principally new constructive decisions.