

**(ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)**

Учреждение образования  
Белорусский государственный университет

**АКСЕНЧИК**  
Анатолий Владимирович

**Нелинейная теория и оптимизация мощных приборов СВЧ  
с дискретным взаимодействием**

01.04.03 – радиофизика

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Минск 2003

Работа выполнена в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ -

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;

доктор физико-математических наук профессор

ДАШЕНКОВ Виталий Михайлович,

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, кафедра радиотехнических устройств;

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы диссертации*

В настоящее время мощные источники электромагнитных колебаний сверхвысокой частоты являются основой для развития таких областей применения, как: наземная и космическая связь, радиолокационные комплексы, радиотехнические системы, передача энергии на дальние расстояния, солнечные космические электростанции, ускорительная техника, термоядерный синтез и др. Поэтому во многих передовых странах, таких как: США, Россия, Англия, Франция, Германия, Япония, Китай, Украина, Белоруссия, Израиль, Польша и др. проводятся теоретические и экспериментальные исследования по разработке новых и совершенствованию известных мощных источников СВЧ излучения. Одними из наиболее перспективных приборов, позволяющих решить большую часть задач из вышеперечисленных областей, являются *многорезонаторный клистрон (МРК)* и *ЛБВ на цепочках связанных резонаторов (ЦСР)*. Во всем мире производство этих приборов составляет миллионы штук в год и не уменьшается: устаревшие модели снимаются с производства, заменяются новыми, более совершенными.

В связи с широким применением приборов этого типа возникает необходимость улучшения таких параметров МРК: коэффициента полезного действия (КПД), выходной мощности, коэффициента усиления и др.

Теория клистронов получила развитие в работах Вебера С., Роу Дж., Михрана Т., Хайкова А.З., Акментыньша Я.Я., Солнцева В.А., Петрова Д.М., Победоносцева А.С., Мальхина А.В., Канавца В.И., Сандалова А.Н.. Значительный вклад в экспериментальные исследования и разработку клистронов внесли Артюх И.Г., Зусмановский С.А., Королев С.В., Гельвич Э.А.

Над проблемами совершенствования и создания новых более мощных МРК, ЛБВ работают организации в США (Калифорнийский, Стэнфордский университеты, Массачусетский технологический институт, Стэнфордский центр линейных ускорителей – SLAC, Национальная лаборатория Лос-Аламоса, Национальная лаборатория NRL, ассоциация VARIAN и др.), Германия (Гамбургский технологический университет, Штутгартский институт нагрева плазмы, фирмы Valvo, Philips-Valvo), Франция (фирма Thomson-CSF), Великобритания (Кейбриджский университет, Королевский колледж и др.), Япония (Японский институт ядерных исследований, фирмы Toshiba, Nippon Electric Co., и др.), Китай (Пекинский, Чарджоуский университеты, Китайский университет электроники и технологии и др.). Достигнуты большие успехи в создании этих приборов: мощность МРК в непрерывном режиме составляет более 1 МВт, в импульсном – более 3 ГВт, при КПД около 50%.

Полученный в экспериментах КПД клистронов 50–60% вполне может быть улучшен путем более тщательной теоретической проработки на основе

достоверных и полных математических моделей процессов взаимодействия. Используемые в настоящее время модели не являются достаточно полными и строгими, часто сформулированы в системе координат Эйлера, что не позволяет учитывать обратное и колебательное движения электронов, не учтен ряд других существенных факторов. Для решения задачи оптимального управления нелинейным процессом взаимодействия следует использовать методы, имеющие устойчивую сходимость поиска оптимальных решений, в том числе и методы поиска глобального экстремума. Существующие методы поиска глобального экстремума не всегда обеспечивают сходимость за приемлемое время расчета.

Поэтому создание эффективных методов последовательного определения локальных экстремумов в заданной области, с целью выявления среди них глобального и полных, обоснованных, совместимых математических моделей процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями является актуальной задачей.

ЛБВ на ЦСР также является прибором, который находит широкое применение в решении многих важных проблем. ЛБВ на ЦСР относится к приборам с *дискретным взаимодействием* потому, что при движении электронного потока встречаются участки свободные от ВЧ-полей (трубки дрейфа) и участки, на которых происходит взаимодействие электронного потока с полем бегущей электромагнитной (ЭМ) волны (ВЧ-поля в зазорах резонаторов, составляющих замедляющую систему).

Экспериментальные и теоретические исследования ЛБВ на ЦСР активно проводятся, в основном, теми же исследовательскими организациями, которые работают с клистродами. Особо следует выделить: США (лаборатория СВЧ-приборов и физической электроники университета штата Юта, USA Secretary of the Army, фирмы Hughes Aircraft, Raytheon, Varian Ass. и др.), Франция (фирма Tomson CSF), Япония (фирма Nippon Electric Co. Ltd – NEC, Токе сибарура дэнки, Ниппон Дэнки К.К.), Великобритания (English Electric Valve), Германия (фирма Siemens AG), Россия (НИИ "Исток", "Титан", МИУ, Саратов – СГУ). Несмотря на то, что в настоящее время создано значительное количество программ расчета ЛБВ на ЦСР на основе подхода о каскадном взаимодействии, проблема поиска вариантов ЛБВ с большим расчетным КПД остается актуальной. Большинство ЛБВ на ЦСР выполнены на основе регулярных ЦСР и электронный КПД не превышает 20–30%. Повышение КПД до 40–50% достигается за счет введения сложных систем рекуперации энергии отработанного электронного потока. Отсутствие ламп и программ расчета ЛБВ с большим КПД объясняется тем, что задача оптимизации в этом случае становится многопараметрической (число резонаторов в замедляющей системе (ЗС) более 10, а параметров в 3–5 раз больше). Расчет одного варианта представляет собой сложную итерационную процедуру, вызванную необходимостью учета встречной волны. Поэтому оптимизация распределения ха-

характеристик резонаторов ЗС с использованием описанных в литературе методов выливается в сложную для современных ЭВМ проблему.

Представленные в данной работе математические модели и алгоритмы позволяют получить оптимальные параметры ЛБВ, ЛОВ с расчетным электронным КПД более 70%. В результате становятся известными параметры соответствующей эквивалентной схемы, моделирующей нерегулярную ЗС. Возникает задача практической реализации нерегулярной ЛБВ – определение геометрических размеров нерегулярной ЗС, задача синтеза. Задача синтеза нерегулярных ЗС в электродинамической постановке является достаточно сложной и неоднозначной. Имеется ряд работ, которые позволяют по заданным электродинамическим характеристикам, используя методы оптимизации, синтезировать резонаторы произвольной формы, составляющих регулярную ЗС. Вопрос синтеза нерегулярных ЗС теоретически проработан недостаточно, поэтому задача синтеза нерегулярных ЗС на ЦСР является актуальной.

В связи с изложенным актуальность темы настоящей работы определяется в научном плане необходимостью получения новых результатов в математическом моделировании нелинейных процессов в приборах с дискретным взаимодействием, разработке эффективного метода поиска локальных экстремумов, с целью выявления среди них глобального, что является важной проблемой в теории и оптимизации мощных приборов СВЧ с дискретным взаимодействием, а в практическом отношении открывает возможность существенного повышения эффективности работы мощных приборов с дискретным взаимодействием путем поиска оптимальных распределений характеристик нерегулярных ЦСР и синтеза геометрических размеров нерегулярных ЦСР.

Учитывая принятую к выполнению в республике Беларусь совместную с Российской Федерацией Государственную научно-техническую программу "Микроволновая аппаратура", а также потребность Беларуси в мощных СВЧ приборах, можно считать тему диссертации актуальной и своевременной.

#### *Связь работы с крупными научными программами, темами*

Одним из основных научных направлений в БГУИР является "Методы моделирования и оптимизации радиоэлектронных систем и устройств" – в рамках которого выполнена диссертация. Результаты диссертационной работы нашли свое отражение в отчетах по 27 НИР, которые выполнялись начиная с 1974 года по заданиям НИИ "Исток" г. Фрязино, НИИ "Титан" г. Москва, Министерства образования РБ и Фонда фундаментальных исследований РБ г. Минск. Последние исследования выполнялись в рамках государственной программы фундаментальных исследований "Волна" РБ по теме "Нелинейное возбуждение электромагнитных волн мощными электронными потоками" ГБЦ 96-3120, № ГР 19962917.

### *Цель и задачи исследования*

Целью работы является создание адекватной нелинейной теории процессов дискретного взаимодействия электронных потоков с ЭМ полями в мощных приборах СВЧ, оптимизация и выявление физических особенностей оптимальных по КПД процессов взаимодействия и их зависимости от изменения параметров приборов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд конкретных задач:

- Разработать нелинейные самосогласованные трехмерные, двумерные и одномерные модели процессов взаимодействия (с формулировкой уравнений состояния в системе  $t, t_0$ ), учитывающие обратное и колебательное движения электронов, релятивистские эффекты, фокусирующее неоднородное магнитостатическое поле, токооседание электронного потока.
- Разработать эффективный метод последовательного определения локальных экстремумов с целью выявления среди них глобального, основанный на использовании информации о рельефе целевой функции;
- Разработать на основе совместимых двумерных и одномерных моделей комплекс программ последовательной оптимизации МРК в полосе частот, отличающийся повышенным быстродействием, точностью и учитывающий многоэкстремальность целевых функций;
- На базе разработанной системы последовательной оптимизации провести оптимизационные расчеты вариантов МРК, исследовать физические особенности оптимальных нелинейных процессов группирования и энергообмена и исследовать влияние на выходные характеристики изменения ускоряющего напряжения, тока луча, диаметра труб дрейфа, диаметра пучка электронов, формы и размеров зазоров, резонаторов на второй гармонике сигнала, фокусирующего магнитного поля, расслоения и перемещивания электронного потока в оптимальных по КПД вариантах. Провести исследования распределенных отбирателей и влияние скачков потенциала на оптимальные характеристики в релятивистских МРК.
- Создать нелинейные самосогласованные математические модели нерегулярных ЛБВ-О на ЦСР, ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах с учетом пространственного заряда, встречного излучения с использованием эквивалентных четырех- и шестиполосников и с применением теории атомарных функций.
- Выявить предельные КПД, исследовать физические особенности оптимальных процессов, получить оптимальные параметры нерегулярных ЛБВ, ЛБВ на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах и провести исследования влияния встречного излучения на частотные характеристики в различных диапазонах волн.

- Создать математическую модель нерегулярной ЛОВ-О на ЦСР, выявить ее предельные возможности, исследовать физические особенности оптимальных процессов в таких приборах, включая гибридные конструкции ЛОВ-ЛБВ.
- Разработать метод синтеза параметров и размеров элементов ЦСР нерегулярных ЛБВ.

#### *Объект и предмет исследования*

Объектом исследования являются электромагнитные поля и электронные потоки в мощных приборах СВЧ с дискретным взаимодействием - МРК, ЛБВ на ЦСР, ЛОВ на ЦСР. Предмет исследования – нелинейные процессы дискретного взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями в мощных приборах СВЧ.

#### *Методология и методы проведенного исследования*

При решении поставленных задач использовались аналитические и численные методы исследования. Расчет динамических и статических процессов взаимодействия в электронных приборах проводился на основе метода крупных частиц решением системы дифференциальных уравнений методами Рунге-Кутты высокого порядка точности и методами прогноза и коррекции Хэмминга. Расчет полей пространственного заряда проводился на основе метода улучшения сходимости рядов А.Н. Крылова. При расчете электрических полей зазоров резонаторов использовалось решение уравнения Лапласа в цилиндрической системе координат методом сеток с последовательной верхней релаксацией. Для аппроксимации распределений вдоль ЛБВ характеристик многополюсников использовался современный метод аппроксимации с применением аппарата атомарных функций. Для поиска оптимальных процессов взаимодействия в электронных приборах использовались разработанный автором метод поиска глобального экстремума и современные методы оптимизации функций  $n$ -переменных с ограничениями, разработанные С.В. Колосовым.

#### *Научная новизна и значимость полученных результатов*

Научная новизна состоит в следующем:

- Впервые сформулированы нелинейные самосогласованные трехмерные и релятивистские двумерные (квазитрехмерные) математические модели процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями в многорезонаторных клистродах, учитывающие поля пространственного заряда. Получены выражения для трехмерных полей пространственного заряда с выделенной особенностью. Учтено "самодействие" частиц, неоднородное и неазимутально-симметричное магнитоэстатическое фокусирующее магнитное поле.

- Предложена новая численно-аналитическая методика расчета процесса взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем в МРК, суть которой в том, что на основе численных расчетов по нелинейной модели определяются параметры аналитической модели, наиболее существенно влияющие на точность расчета клистрона: активная и реактивная составляющие проводимости пучка; коэффициент эффективности взаимодействия; таблица "эффективных" плазменных частот с учетом модуляции электронного потока по скорости и по плотности; учитывается нелинейность модуляции в зазоре резонатора. По точности аналитическая модель, с применением упомянутой методики, не уступает дисковой модели с эквивалентными плоскими зазорами, а по быстродействию значительно превосходит ее.
- Предложен новый метод последовательного определения локальных экстремумов (ПОЛЭ) с целью выявления среди них глобального. Отличием этого метода от существующих является использование в качестве направлений перевала в области притяжения соседних экстремумов главных осей функции. Главные оси функции определяются как собственные векторы матрицы Гессе в точке экстремума, которая строится в процессе поиска локального экстремума градиентными методами с переменной метрикой. Собственные числа матрицы Гессе позволяют выбрать шаг движения по направлению перевала. Введена эффективная процедура исключения уже исследованных областей. Метод позволяет за конечное число итераций выявить в заданной области все локальные экстремумы и определить глобальный.
- Предложена система последовательной оптимизации МРК, основанная на полных, совместимых математических моделях процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями в МРК и использующая метод ПОЛЭ.
- Для конструкций 5–8 резонаторных клистронов на основе строгого решения задачи оптимизации МРК по КПД впервые определены оптимальные параметры в широком диапазоне изменения ускоряющих напряжений, токов электронного луча, диаметров пролетных каналов и ширины зазоров резонаторов. Показано, что эффекты перемешивания и расслоения электронного потока в полностью оптимизированных вариантах клистронов несущественно ухудшают процессы взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями. Впервые получил физическое объяснение эффект "догрушировки".
- Впервые показано, что характер распределения оптимальных длин трубок дрейфа и расстроек МРК оптимизированных в полосе частот и на одной частоте существенно различаются: в полосе частот – длины монотонно уменьшаются, последняя длина несколько увеличена, расстройки первых двух резонаторов отрицательные, остальные положительные и монотонно



возрастают, предпоследний резонатор отстроен за полосу усиления; на одной частоте – оптимальные длины монотонно уменьшаются, расстройки вначале возрастают, затем монотонно уменьшаются.

- Впервые проведена машинная оптимизация релятивистских МРК высокой и сверхвысокой мощности; выяснены особенности процессов взаимодействия в МРК на релятивистских электронных потоках – несимметрия фазовой группировки электронов, модуляция по скорости также несимметрична и относительно мала, отбор энергии от сгустка идет, в основном, не за счет изменения скорости электронов, а за счет изменения их массы при торможении в поле зазора выходного резонатора. Определены оптимальные параметры конструкций МРК с ускоряющими напряжениями 500, 1000, 1500 кВ, мощностью 5–675 МВт, КПД 80–90% и коэффициентом усиления более 60 дБ.
- Впервые на основе машинного эксперимента исследованы распределенные отбиратели на автономных резонаторах и даны рекомендации по повышению эффективности энергоотбора в них от сгруппированного электронного потока.
- Впервые проведено исследование влияния скачка потенциала в релятивистских клистронах. Если скачок потенциала применяется в распределенных отбирателях, то в оптимальных условиях возможно повышение КПД на 5–8% при существенном (до 25%) увеличении выходной мощности. При использовании скачка потенциала в группирователе релятивистского МРК возможно сокращение оптимальной длины прибора в 3–4 раза при сохранении высокого КПД 80–90%.
- Впервые разработаны нелинейные самосогласованные математические модели ЛБВ на ЦСР с использованием эквивалентных четырех- и шестиполосников, позволяющие проводить синтез электрических параметров эквивалентных схем нерегулярных ЦСР и согласование полей с учетом встречного излучения и распределенных потерь.
- Впервые предложены методики оптимизации распределений характеристических сопротивлений и коэффициентов фаз эквивалентных четырехполосников и шестиполосников, моделирующих нерегулярную ЦСР ЛБВ-О, с применением теории атомарных функций. Использование для аппроксимации атомарных функций намного повышает устойчивость поиска оптимального решения при изменениях оптимизируемых параметров в процессе поиска.
- Впервые предложено при каждом расчете целевой функции проводить синтез электрических параметров эквивалентных многополосников, моделирующих ЦСР, и анализ режима с учетом встречной волны. Это позволило при оптимизации устранить накопление погрешности и впервые получить оптимальные варианты нерегулярных ЛБВ с высоким КПД более 75%.

- Впервые проведена оптимизация нерегулярных многосекционных ЛБВ на ЦСР и получены их оптимальные параметры.
- Впервые предложено для расширения полосы усиления нерегулярных ЛБВ использовать регулярные подсекции с небольшим (два-три) числом резонаторов. Это позволило получить полосу усиления 5–8%, КПД – 30–70%, коэффициент усиления 15–20 дБ.
- Впервые разработана нелинейная самосогласованная математическая модель ЛБВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе с использованием эквивалентных четырехполюсников. Релятивистские ЛБВ, рассчитанные по этой модели, имеют электронный КПД 65%, коэффициент усиления по мощности 15 дБ, полосу усиления 30% в см-диапазоне длин волн.
- Впервые на основе разработанных математических моделей с эквивалентными шестиполюсниками проведена оптимизация нерегулярных ЛОВ и гибридных приборов ЛОВ-ЛБВ.
- Разработаны новые алгоритмы синтеза геометрических размеров резонаторов и щелей связи нерегулярных ЦСР. В алгоритмах используются дисперсионные уравнения цепочки связанных резонаторов и соответствующих эквивалентных схем. Путем решения соответствующим образом составленных нелинейных уравнений, получены размеры резонаторов и щелей связи нерегулярных ЛБВ высокой эффективности.

Научная значимость полученных результатов заключается в следующем:

- Приведенные в диссертации нелинейные самосогласованные релятивистские математические модели процессов взаимодействия в многорезонаторном клистроне могут использоваться для исследования нелинейных процессов в приборах с дискретным взаимодействием в широком диапазоне изменения длин волн, ускоряющих напряжений, токов электронного пучка,
- Разработанный в диссертации метод поиска глобального экстремума может служить основой для развития методов глобальной оптимизации.
- Выявленные специфические нелинейные процессы взаимодействия в релятивистских МРК образуют новый комплекс знаний в области радиофизики и нелинейной динамики ансамбля взаимодействующих между собой релятивистских частиц.
- Полученные в диссертации нелинейные самосогласованные математические модели с использованием четырех- и шестиполюсников, учитывающие встречное излучение электронов, позволяют выявить предельные возможности приборов с дискретным взаимодействием – ЛБВ, ЛОВ-О на ЦСР, ЛБВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе в СМ- и ММ-диапазонах длин волн, а также гибридных приборов ЛОВ-ЛБВ.

- Разработанный в диссертации метод синтеза размеров резонаторов и щелей связи нерегулярных ЦСР может служить основой для создания методов синтеза физических параметров электродинамических систем другой конфигурации при известных параметрах эквивалентных схем и их дисперсионных характеристик

### *Практическая значимость полученных результатов*

Разработанные в диссертации математические модели процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями и созданный на их основе комплекс программ системы последовательной оптимизации целесообразно использовать для разработки новых конструкций МРК в полосе частот с улучшенными выходными характеристиками.

Созданные программы применялись при создании новых конструкций МРК на предприятиях электронной промышленности Российской Федерации, что отражено в актах внедрения программ, приведенных в приложении 3. Результаты оптимизации и анализа показали высокую точность расчета и возможность существенного сокращения времени и материальных затрат на проектирование.

Результаты исследований различных вариантов МРК содержат важные практические рекомендации по их оптимальному проектированию. Предложены новые конструкции вариантов МРК, не уступающие по КПД приборам магнетронного типа, а по мощности и коэффициенту усиления на несколько порядков превосходящие их.

Разработанный метод поиска глобального экстремума и созданная на его основе программа была внедрена и использовалась на ПО "Интеграл".

Разработанные в диссертации математические модели, алгоритмы и комплекс программ расчета и оптимизации конструкций ЛБВ, ЛОВ на ЦСР составляют основу для исследований нелинейных процессов взаимодействия электронного потока и электромагнитной волны при создании высокоэффективных приборов с дискретным взаимодействием.

Предложенные в работе конструкции высокоэффективных мощных приборов СВЧ (МРК, ЛБВ, ЛОВ, ЛОВ-ЛБВ, ЛБВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе) могут с успехом использоваться в качестве усилителей и генераторов дециметрового, сантиметрового, миллиметрового диапазонов для систем связи, радионавигации, в линейных ускорителях для научных исследований, для систем передачи энергии на дальние расстояния, для получения новых материалов в промышленности, для создания новых радиолокационных систем, когда требуются большие уровни СВЧ мощности при минимальных объемах и массах генераторов СВЧ.

Результаты диссертации использовались при выполнении хозяйственных и госбюджетных ИПР.

*Основные положения диссертации, выносимые на защиту*

1. Нелинейные самосогласованные трехмерные и релятивистские двумерные математические модели процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями в многорезонаторных клистродах, учитывающие поля пространственного заряда (с выделенной особенностью), "самодействие" частиц, неоднородное магнитостатическое фокусирующее поле и которые реализованы в комплексе программ оптимизации мощных приборов СВЧ с дискретным взаимодействием.
2. Новый метод глобальной оптимизации нелинейных процессов в мощных приборах СВЧ.
3. Численно-аналитическая методика расчета процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитным полем в многорезонаторных клистродах, которая позволяет при резком сокращении затрат машинного времени обеспечить необходимую точность и определить оптимальные параметры клистронов с максимально возможными КПД.
4. Оптимальные варианты высокоэффективных МРК с ускоряющим напряжением 6–50 кВ; физические особенности оптимальных процессов в них: эффект "догруппировки", характерные особенности распределения параметров высокоэффективных приборов, позволяющие получить высокие КПД, в том числе и в полосе частот, рекомендации для повышения надежности и долговечности приборов.
5. Оптимальные структуры распределенных отбирателей на автономных резонаторах релятивистских МРК, физические особенности процессов взаимодействия в релятивистских МРК, учет которых позволяет получить максимально возможные КПД. Оптимальные параметры релятивистских МРК с КПД 80–90%, мощностью 5–675 МВт.
6. Результаты исследований влияния скачка потенциала на процессы взаимодействия в релятивистских клистродах, которые впервые позволили разработать рекомендации для существенного увеличения выходной мощности, КПД, сокращения в 3–4 раза длины прибора при сохранении высокого КПД 80–90%.
7. Нелинейные самосогласованные математические модели нерегулярных ЛБВ и ЛОВ на ЦСР, ЛБВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе; методики оптимизации распределений характеристических сопротивлений и коэффициентов фаз эквивалентных четырехполюсников и шестиполюсников, моделирующих нерегулярную ЦСР ЛБВ-О, с применением теории атомарных функций. Они позволяют выявить характерные распределения оптимальных параметров нерегулярных ЛБВ-О на ЦСР (расчетный электронный КПД более 75%); определить оптимальные параметры нерегулярных ЛОВ-О, ЛОВ-ЛБВ с расчетным электронным КПД более

- 60%, релятивистских ЛБВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе с электронным КПД 65%
8. Результаты исследований нерегулярных многосекционных ЛБВ на ЦСР показывающие, что для расширения полосы усиления нерегулярных ЛБВ следует использовать регулярные подсекции с небольшим (два-три) числом резонаторов – это позволяет получить полосу усиления 5–8%, КПД – 40–70%, коэффициент усиления 15–20 дБ.
  9. Алгоритмы синтеза геометрических размеров резонаторов и щелей связи нерегулярных ЦСР.

### *Личный вклад соискателя*

Автор принимал непосредственно участие в получении всех результатов представленных в диссертации.

Автором лично получены следующие результаты:

- Сформулированы двумерные нелинейные самосогласованные релятивистские математические модели процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями в многорезонаторных клистродах, учитывающие поля пространственного заряда, "самодействие" частиц, неоднородное фокусирующее магнитное поле.
- Сформулированы одномерные нелинейные, самосогласованные релятивистские модели процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями в системах  $t, t_0$ ;  $z, z_0$  и создана численно-аналитическая методика расчета процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями МРК.
- На основе разработанных совместимых двумерных и одномерных математических моделей предложена система последовательной оптимизации МРК, которая реализована автором в виде комплекса подпрограмм математического моделирования и оптимизации МРК.
- Предложен новый метод последовательного определения локальных экстремумов с целью выявления среди них глобального и реализован автором в виде программы поиска глобального экстремума в системе программирования Delphi.
- В результате расчетов по этим программам на основе строгого решения задачи оптимизации МРК (в том числе и релятивистских) определены их оптимальные параметры в широком диапазоне ускоряющих напряжений, токов электронного луча, диаметров пролетных каналов.
- Проведено исследование распределенных отбирателей на автономных резонаторах для релятивистских клистронов.
- Впервые исследовано влияние скачка потенциала в релятивистских клистродах и даны рекомендации по улучшению характеристик и конструкций релятивистских МРК.

- Сформулированы нелинейные самосогласованные математические модели ЛБВ на ЦСР с применением теории атомарных функций, позволяющие проводить оптимизацию и синтез параметров эквивалентных схем ЦСР, согласование полей с учетом встречного излучения.
- Проведена оптимизация нерегулярных ЛБВ на ЦСР, ЛОВ, гибридных приборов ЛОВ-ЛБВ высокой эффективности и выявлены предельные возможности этих приборов.
- Разработаны методы синтеза геометрических размеров резонаторов и щелей связи нерегулярных ЦСР.

Совместно с профессором А.А. Кураевым

- получены трехмерные нелинейные, самосогласованные математические модели процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями в МРК, учитывающие поля пространственного заряда, неоднородное фокусирующее магнитное поле;
- проведен анализ существующих методов поиска глобального экстремума многопараметрических функций и разработаны основы нового метода поиска глобального экстремума для решения задач оптимального управления;
- разработаны основы теории строгого расчета сил пространственного заряда в одно-, двух-, трехмерных моделях процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями;
- разработаны основы применения теории атомарных функций в задачах оптимального управления процессами взаимодействия.
- разработаны физические основы дискретного взаимодействия электронов с полем незамедленных волн в волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе.

#### *Апробация результатов диссертации*

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих всесоюзных и международных конференциях и симпозиумах:

- 31 Всесоюзной сессии НТО РЭС им. А.С.Попова, г. Москва, 1976;
- 33 Всесоюзной сессии НТО РЭС им. А.С.Попова, г. Москва, 1978;
- IX всесоюзной конференции по электронике сверхвысоких частот, г. Киев, 1979;
- X Всесоюзной конференции "Электроника СВЧ", г. Минск, 1983г.
- VI Всесоюзном семинаре по релятивистской электронике, г. Москва, 1984;
- 39 Всесоюзной научной сессии НТО РЭС им. А.С.Попова, г. Москва, 1984;

- IX Всесоюзном семинаре " Колебательные явления в потоках заряженных частиц", г. Ленинград, 1984;
- 9-ой Международной Крымской микроволновой конференции КрыМиК'099, г. Севастополь, Крым, Украина, 1999;
- International Vacuum Electronics Conference 2000, DoubleTree Hotel Monterey, California, May 2–4, 2000;
- 10-ой Международной Крымской микроволновой конференции КрыМиК'02000, г. Севастополь, Крым, Украина, 2000;
- 2-nd IEEE International Vacuum Electronics Conference 2001, Huis ter Duin, Noordwijk The Netherlands, April 2–4, 2001;
- Fourth International Kharkov Symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves"/Kharkov, Ukraine, June 4–9, 2001;
- 11-ой Международной Крымской микроволновой конференции КрыМиК'02001, г. Севастополь, Крым, Украина, 2001;
- Third IEEE International Vacuum Electronics Conference 2002, DoubleTree Hotel Monterey, California, April 23–25, 2002;
- 12-ой Международной Крымской микроволновой конференции КрыМиК'02002, г. Севастополь, Крым, Украина, 2002;

#### *Опубликованность результатов*

Основные результаты диссертации опубликованы в 1 монографии, 18 статьях в научных журналах, 1 статье в сборнике научных трудов, 8 статьях в сборниках материалов международных конференций и 7 тезисах докладов. Общее количество страниц опубликованных материалов составляет 552.

#### *Структура и объем диссертации*

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения и трех приложений. Полный объем диссертации составляет 372 страницы, в том числе 87 страниц занимает 121 рисунок, 29 страниц занимают 40 таблиц, 37 страниц занимают 3 приложения. Список использованных источников состоит из 180 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** дан обзор литературы и рассмотрены основные этапы развития теории и экспериментальных исследований многорезонаторных клистронов. Выявлены нерешенные проблемы при построении математических моделей и даны направления к построению адекватных математических моделей, составляющих основу нелинейной теории МРК. Основным принципом работы пролетного клистрона является преобразование скоростной мо-

люсниками и шестиполусниками. Рассмотрены вопросы выбора эквивалентного многополусника при замене реальных ячеек ЗС эквивалентными схемами. Получены законы распределения характеристических сопротивлений и коэффициентов фаз вдоль ЦСР, которые позволяют достичь высоких КПД в нерегулярных ЛБВ. Это позволило выявить предельные возможности нерегулярных ЛБВ-О на ЦСР (электронный КПД более 75%) [14, 15, 18] и провести оптимизацию нерегулярных ЛОВ-О, ЛОВ-ЛБВ с расчетным электронным КПД более 60% [20].

9. Показано, что у нерегулярных многосекционных ЛБВ [17] электронный КПД достигает 60%, коэффициент усиления 35–40дБ, однако полоса усиливаемых частот составляет 2–3%. Для расширения полосы частот предложено использовать регулярные подсекции с небольшим числом (2–3) резонаторов. Это позволяет в нерегулярных ЛБВ в полосе 5–8% получить электронный КПД 30–70%, при коэффициенте усиления 15–20дБ. Разработаны математическая модель и алгоритм расчета ЛБВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе [1]. Исследование показало, что релятивистские ЛБВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе имеют расчетный электронный КПД 65%, коэффициент усиления по мощности 15 дБ, полосу усиления 30% в см-диапазоне длин волн.

10. Разработаны алгоритмы синтеза геометрических размеров резонаторов и щелей связи [19, 26]. В алгоритмах используются дисперсионные уравнения цепочки связанных резонаторов и соответствующей эквивалентной схемы. Алгоритмы позволяют путем определенного выбора резонансной длины волны, волнового сопротивления щели, угла поворота щелей в соседних диафрагмах получить достаточно полное (1–2%) совпадение дисперсионных характеристик связанного резонатора и соответствующей эквивалентной схемы. В алгоритмах используются соответствующим образом составленные нелинейные уравнения, решение которых позволяет получить размеры резонаторов и щелей связи нерегулярной ЗС.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### *Монографии*

1. Аксенчик А.В., Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ с дискретным взаимодействием (теория и оптимизация). –Мн: Бестпринт, 2003.–376 с.

### *Статьи*

2. Аксенчик А.В., Ковалев И.С., Колосов С.В., Кураев А.А., Шестакович В.П. Оптимизация многорезонаторных клистронов в полосе частот // Изв.АН БССР, серия физ.-тех. наук. 1981.–Вып.2.–С. 117–121.
3. Аксенчик А.В., Ковалев И.С., Колосов С.В., Кураев А.А., Шестакович В.П. Исследование оптимальных по КПД режимов и конструкций многорезона-



- торных клистронов // Изв.АН БССР, серия физ.-тех. наук.—1981.—Вып.3—С. 111—115.
4. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А. Метод разделения параметров для решения задач оптимизации электронных приборов СВЧ // Радиотехника и электроника: Республ. Межвед. сб. —Минск: Высшейшая школа, 1982.—Вып.11.—С. 86—91.
  5. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А., Шестакович В.И. Результаты оптимизации КПД многорезонаторных клистронов // Радиотехника и электроника.—1982.—Т.27, №12.—С. 2426—2434.
  6. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А., Парамонов Б.М. Моделирование и исследование оптимальных по КПД процессов взаимодействия в многорезонаторных клистролах // Радиотехника и электроника.—1983.—Т.28, №2.—С. 336—345.
  7. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А., Парамонов Б.М. Восьмирезонаторные оптимизированные по КПД релятивистские клистроны // Радиотехника и электроника.—1986.—Т.31, №7.—С. 1368—1374.
  8. Аксенчик А.В., Кураев А.А. Двумерные эффекты в оптимизированных по КПД многорезонаторных клистролах // Радиотехника и электроника.—1988.—Т.32, №6.—С.1240—1249.
  9. Аксенчик А.В., Артюх И.Г. Колосов С.В. Оптимизированные по КПД релятивистские многорезонаторные клистроны с распределенным отбором энергии // Радиотехника и электроника.—1989.—Т.34, №6.—С. 1255—1263.
  10. Аксенчик А.В., Кураев А.А. Многорезонаторные клистроны со скачком потенциала // Радиотехника и электроника.—1989.—Т.34, №10.—С. 2157—2165.
  11. Аксенчик А.В., Кураев А.А. Моделирование дискретного электронно-волнового взаимодействия в лампах бегущей волны // Радиотехника и электроника.—1992.—Т.37, №9.—С.1654—1658.
  12. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Математическое моделирование и оптимизация по КПД процессов взаимодействия в мощных многорезонаторных клистролах // Успехи современной радиоэлектроники. 1997.—№4.—С.45—58.
  13. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Навроцкий А.А., Синицын А.К. Оптимизация ЛБВ-0 на нерегулярной цепочке связанных резонаторов // Электромагнитные волны и электронные системы.—2000.—Т.5, №2.—С.28—34.
  14. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Синицын А.К. Оптимизация параметров нерегулярной ЛБВ на цепочке связанных резонаторов в полосе частот // Радиотехника.—2001.—№4.—С.21—26.
  15. Аксенчик А.В., Кравченко В. Ф., Кураев А.А., Синицын А.К. Оптимизация нерегулярных ЛБВ на цепочке связанных резонаторов ММ-диапазона с использованием атомарных функций // Электромагнитные волны и электронные системы.—2001.—Т.6, №1.—С.43—47.

16. Аксенчик А.В. Метод поиска глобального экстремума для решения задач оптимального управления с использованием теории атомарных функций // Электромагнитные волны и электронные системы. –2001. –Т.6, №4. –С.27–32.
17. Аксенчик А.В. Моделирование эффективных нерегулярных многосекционных ЛБВ на ЦСР // Весці нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі, серыя фізіка-тэхнічных навук. –2002.–№1.–С.55–63.
18. Аксенчик А.В. Моделирование эффективных нерегулярных ЛБВ на ЦСР с использованием эквивалентных четырех- и шестиполосников // Электромагнитные волны и электронные системы. –2002.–Т.7, №3. –С.42–53.
19. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Сеницын А.К. Синтез нерегулярной цепочки связанных резонаторов оптимизированных ЛБВ // Электромагнитные волны и электронные системы. –2002. –Т.7, №6. –С.50–57.
20. Аксенчик А.В. Моделирование нерегулярных ЛОВ-О на цепочках связанных резонаторов // Весці нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі, серыя фізіка-тэхнічных навук. –2003.–№1.–С.72–80.

*Материалы международных конференций*

21. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Сеницын А.К. Высокоэффективные нерегулярные ЛБВ на ЦСР // Материалы 9-ой Международной Крымской микроволновой конференции КрыМиК'о 99. Севастополь, 1999. –С.125–126.
22. Aksenchuk A.V., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. Irregular Coupled-Cavity TWT with High Efficiency // International Vacuum Electronics Conference 2000, DoubleTree Hotel Monterey, California, May 2-4. –California, 2000. –P.24–25.
23. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Сеницын А.К. Нерегулярные эффективные секционные ЛБВ на ЦСР // Материалы 10-ой Международной Крымской микроволновой конференции КрыМиК'о 2000. –Севастополь, 2000. –С.181–182.
24. Aksenchuk A.V., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. Sectionalized Irregular Coupled-Cavity TWT // 2-nd IEEE International Vacuum Electronics Conference 2001, Huis ter Duin, Noordwijk The Netherlands, April 2-4, 2001. –Noordwijk, 2001. –P.24–25.
25. Aksenchuk A.V. Optimization Irregular Coupled-Cavity TWT // Fourth International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves” Kharkov, Ukraine, June 4-9, 2001. –Kharkov, 2001. –P.262–264
26. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Сеницын А.К. Синтез оптимизированной нерегулярной цепочки связанных резонаторов ЛБВ-О // Материалы 11-ой Международной Крымской микроволновой конференции КрыМиК'о 2001.–Севастополь, 2001. –С. 184–185.
27. Aksenchuk A.V., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. Synthesis Slow-Wave Structure for Irregular Coupled-Cavity TWT with High Efficiency // Third IEEE Interna-

tional Vacuum Electronics Conference 2002, DoubleTree Hotel Monterey, California, April 23-25, 2002. California, 2002. –P.98–99.

28. Аксенчик А.В., Кураев А.А., Синицын А.К. Эффективные нерегулярные ЛОВ-О на ЦСР // Материалы 12-ой Международной Крымской микроволновой конференции КрыМик'о 2002, –Севастополь, 2002. –С. 188–189.

*Тезисы докладов*

29. Аксенчик А.В., Божаткин А.Ф., Колосов С.В., Кураев А.А., Слепян Г.Я., Стекольников А.Ф., Шестакович В.П. Программа расчета и оптимизации многорезонаторных О и МЦР клистронов с аксиальной симметрией // 31 Всесоюзная научная сессия НТО РЭС им. А.С. Попова: Тезисы докладов – М., 1976. –С.29.

30. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А., Шестакович В.П. Быстродействующая программа оптимизации МРК в полосе частот // 33 Всесоюзная сессия НТО РЭС им. А.С.Попова: Тезисы докладов. –М., 1978. –С.24.

31. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А., Шестакович В.П. Исследование оптимальных условий в МРК на основе АУС – метода и двумерных, одномерных моделей // IX Всесоюзная конференция по электронике СВЧ: Тезисы докладов. –Киев, 1979. –С.37.

32. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А. Восьмирезонаторные оптимизированные по КПД релятивистские клистроны // Электроника СВЧ: Тезисы X Всесоюзной конференции "Электроника СВЧ", Минск, 20-23 сентября 1983г. / МРТИ.–Минск, 1983. –С.276–277.

33. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А. Эффективные усилители на РЭП // Тезисы VI Всесоюзного семинара по релятивистской электронике. / МГУ. –М., 1984. –С.–27.

34. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А. Релятивистские многорезонаторные клистроны с отбирателем на автономных резонаторах // 39 Всесоюзная научная сессия НТО РЭС им. А.С. Попова: Тезисы докладов. М., 1984. –С. 29.

35. Аксенчик А.В., Колосов С.В., Кураев А.А. Оптимизированные релятивистские многорезонаторные клистроны с распределенным отбором энергии // Тезисы IX Всесоюзного семинара "Колебательные явления в потоках заряженных частиц". / ЛЭТИ.–Ленинград, 1984. –С. 21.

*А.В.*

## РЭЗЮМЭ

Аксенчык Анатолій Уладзіміравіч. Нелінейная тэорыя і аптымізацыя магутных прыбораў ЗВЧ з дыскрэтным узаемадзеяннем.

Ключавыя словы: звышвысокія частоты, аптымізацыя, рэлятывісцкая электроніка, нелінейныя працэсы, клістрон, лампа беглай хвалі (ЛБХ), лампа адваротнай хвалі тыпа - "О" (ЛАХ- О), ланцуг пазвязаных рэзанатараў, сінтэз, дыскрэтнае узаемадзеянне, аўтаномныя рэзанатары, скачок патэнцыяла, нерэгулярная запаволеная сістэма.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца электрамагнітныя палі і электронныя патокі ў магутных прыборах ЗВЧ з дыскрэтным узаемадзеяннем - МРК, ЛБХ на ЦСР, ЛАХ на ЦСР.

Прадмет даследавання - нелінейныя працэсы дыскрэтнага узаемадзеяння электронных патокаў з электрамагнітнымі палямі ў магутных прыборах ЗВЧ.

Мэтай дысертацыі з'яўляецца стварэнне адэкватнай нелінейнай тэорыі працэсаў дыскрэтнага узаемадзеяння электронных патокаў з ЭМ палямі ў магутных прыборах ЗВЧ, аптымізацыя і выяўленне асаблівасцей аптымальных па КПД працэсаў узаемадзеяння і іх залежнасці ад відазмяненых параметраў прыбораў.

У дысертацыі распрацаваны нелінейныя самаўзгодненыя рэлятывісцкія матэматычныя мадэлі працэсаў узаемадзеяння ў многарэзанатарным клістроне, ЛБХ на ЦСР, ЛАХ на ЦСР, ЛБХ на хвалепадобна выгнутым прамавугольным хваляводзе, якія могуць выкарыстоўвацца ў даследаваннях нелінейных працэсаў у розных прыборах з дыскрэтным узаемадзеяннем у шырокім дыяпазоне змянення даўжыні хвалі, паскоранага напружання, токаў электроннага пучка. Распрацаваны ў дысертацыі новы метады пошука глабальнага экстрэму дапамагае вырашаць задачы аптымальнага кіравання дынамічнымі працэсамі не толькі ў электроніке ЗВЧ, але і ў другіх галінах радыёфізікі. Рэзультаты даследавання нелінейных працэсаў у рэлятывісцкіх МРК садзейнічаюць стварэнню перспектыўных высокаэфектыўных прыбораў (з КПД 80-90%, узмацненне 50-70 дБ ) вялікай магутнасці і складаюць новы комплекс ведаў у галіне радыёфізікі і нелінейнай дынамікі ансамбля ўзаемадзейных рэлятывісцкіх часціц. Распрацаваны ў дысертацыі новы метады сінтэза геаметрычных размераў рэзанатараў і шчылін сувязі нерэгулярных ЦСР дапамагае значна паскорыць працэс рэалізацыі высокаэфектыўных прыбораў з дыскрэтным узаемадзеяннем.

Даследаваныя прыборы з'яўляюцца асновай дзеля прагрэса ў такіх галінах, як : наземная і касмічная сувязь, радыелакацыйныя комплексы, радыётэхнічныя сістэмы, паскаральная тэхніка, тэрмаядзерны сінтэз і др.

## РЕЗЮМЕ

Аксенчик Анатолий Владимирович. Нелинейная теория и оптимизация мощных приборов СВЧ с дискретным взаимодействием

Ключевые слова: сверхвысокие частоты, оптимизация, релятивистская электроника, нелинейные процессы, клистрон, лампа бегущей волны (ЛБВ), лампа обратной волны типа "О" (ЛОВ-О), цепочка связанных резонаторов (ЦСР), синтез, дискретное взаимодействие, автономные резонаторы, скачок потенциала, нерегулярная замедляющая система.

Объектом исследования являются электромагнитные поля и электронные потоки в мощных приборах СВЧ с дискретным взаимодействием – многорезонаторный клистрон (МРК), ЛБВ на ЦСР, ЛОВ на ЦСР.

Предмет исследования – нелинейные процессы дискретного взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями в мощных приборах СВЧ.

Целью работы является создание адекватной нелинейной теории процессов дискретного взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями в мощных приборах СВЧ, оптимизация и выявление физических особенностей оптимальных по КПД процессов взаимодействия и их зависимости от изменения параметров приборов.

В диссертации разработаны нелинейные самосогласованные релятивистские математические модели процессов взаимодействия в многорезонаторном клистроне, ЛБВ на ЦСР, ЛОВ-О на ЦСР, ЛБВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе, которые могут использоваться для исследования нелинейных процессов в различных приборах с дискретным взаимодействием в широком диапазоне изменения длин волн, ускоряющих напряжений, токов электронного пучка. Разработанный в диссертации новый метод поиска глобального экстремума позволяет решать задачи оптимального управления динамическими процессами не только в электронике СВЧ, но и в других областях радиофизики. Результаты исследования нелинейных процессов в релятивистских МРК открывают перспективы создания высокоэффективных приборов (с КПД 80–90%, усилением 50–70 дБ) большой мощности и образуют новый комплекс знаний в области радиофизики и нелинейной динамики ансамбля взаимодействующих между собой релятивистских частиц. Разработанный в диссертации новый метод синтеза размеров резонаторов и щелей связи нерегулярных ЦСР позволит значительно ускорить процесс реализации высокоэффективных приборов с дискретным взаимодействием.

Исследованные приборы являются основой для прогресса в таких областях, как: наземная и космическая связь, радиолокационные комплексы, радиотехнические системы, ускорительная техника, термоядерный синтез и др.

## SUMMARY

Aksenchyk Anatoly Vladimirovich. The nonlinear theory and optimization of powerful devices of a microwave with discrete interaction

**Key words:** microwave, optimization, relativistic electronics, nonlinear processes, klystron, traveling wave tube (TWT), backward-wave oscillator O-type (BWO-O), coupled-cavity, synthesis, discrete interaction, independent cavities, jump of potential, irregular slow-wave structure.

Object of research are the electromagnetic fields and electronic flows in powerful devices of a microwave with discrete interaction - multycavity klystron, a coupled-cavity TWT, a coupled-cavity BWO.

Subject of research are nonlinear processes of discrete interaction of electronic flows with electromagnetic fields in powerful devices of a microwave.

The purpose of thesis is the creation of the adequate nonlinear theory of processes of discrete interaction of electronic beams with electromagnetic fields in powerful devices of a microwave, optimization and revealing of physical features optimum till efficiency of processes of interaction and their dependence on change of parameters of devices.

In the thesis the nonlinear self-consistent relativistic mathematical models of processes of interaction in multycavity klystron, coupled-cavity TWT, coupled-cavity BWO, TWT on the wavy bent rectangular waveguide are developed. This model for suggested of nonlinear processes in various devices with discrete interaction in a wide range of change of lengths of waves accelerating voltage, currents of an electronic beam can be used. The new method, developed in the thesis, of search global extremum allows to decide tasks of optimum control of dynamic processes not only in electronics of a microwave, but also in other areas of radiophysics. The results of research of nonlinear processes in relativistic multycavity klystron open prospects of creation of highly effective devices (from efficiency 80-90 %, by gain 50-70 dB) high-power and form a new complex of knowledge in the field of radiophysics and nonlinear dynamics of ensemble of cooperating among themselves relativistic particles. The new method, developed in the thesis, of synthesis the sizes of cavities and slot of coupling of irregular coupled-cavities will allow considerably to speed up the process of realization of highly effective devices with discrete interaction.

Explored devices are a basis for progress in such areas, as: ground and space communication, radar-tracking complexes, radio engineering systems, acceleration technology, thermonuclear synthesis and so on.