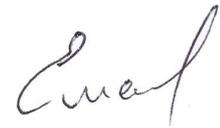


На правах рукописи



ЕМЕЛЬЯНОВ Валерий Валерьевич

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА АВТОГЕНЕРАТОРОВ
С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ НА ОСНОВЕ МНОГОРЕЗОНАТОРНЫХ
ПРОЛЕТНЫХ КЛИСТРОНОВ**

01.04.03–Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Саратов – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» на кафедре нелинейной физики факультета нелинейных процессов

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор **Рыскин Никита Михайлович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Астахов Владимир Владимирович**, ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», заведующий кафедрой «Радиотехника»

кандидат физико-математических наук **Комаров Дмитрий Александрович**, ФГУП «НПП «Торий», г. Москва, начальник отдела проектирования и разработки приборов с распределенным взаимодействием

Ведущая организация: Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится 31 мая 2013 года в 15³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 на базе Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, III корпус, ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского.

Автореферат разослан «__» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аникин В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Исследование нелинейных нестационарных процессов в различных приборах сверхвысокочастотной электроники остается одной из важных проблем радиофизики уже более 30 лет. Очевидное фундаментальное и прикладное значение имеют такие задачи как изучение паразитного самовозбуждения усилителей, генерация хаотических колебаний, усиление многочастотных сигналов и коротких импульсов, и др. Основным инструментом теоретического анализа подобных явлений является численное моделирование. В настоящее время для моделирования нестационарных процессов в вакуумных приборах существуют мощные универсальные полностью электромагнитные коды, такие как MAFIA, MAGIC, CST STUDIO и др., в которых электродинамическая часть задачи решается при помощи непосредственного интегрирования уравнений Максвелла с заданными граничными условиями. Однако применение упомянутых пакетов программ является трудоемкой задачей, требующей больших затрат машинного времени и значительных вычислительных ресурсов. Поэтому по-прежнему актуальна разработка программ численного моделирования, основанных на использовании различных вариантов нестационарной теории возбуждения электродинамических структур электронными пучками.

Среди приборов вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники важное место занимают усилители и генераторы на основе пролетных клистронов, которые широко используются в ускорителях элементарных частиц, радиоастрономии, радиолокации, телекоммуникационных системах. В последнее время усилился интерес к генераторам на основе пролетных клистронов с запаздывающей обратной связью (ЗОС)¹. Для них весьма характерными являются автомодуляционные и хаотические режимы генерации, в связи с чем клистроны-генераторы с ЗОС могут найти применение, например, в системах передачи информации и радиолокации на основе динамического хаоса^{2,3}.

Следует отметить, что детальное исследование картины динамических режимов клистронов-генераторов с ЗОС представляет довольно трудоемкую задачу. В работах^{4,5} была развита нестационарная теория генераторов клистронного типа на основе упрощенных моделей в виде систем дифференциальных уравнений с запаздыванием. В частности, было показано, что в клистронегенераторе с внешней ЗОС по мере увеличения тока электронного пучка происходит потеря устойчивости одночастотного режима генерации с возникновением автомодуляции и последующее возникновение динамического хаоса. Сопо-

¹ Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Рыскин Н.М., Шигаев А.М. Теоретическое и экспериментальное исследование хаотических колебаний клистронного автогенератора с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 5. С. 604-610.

² Kennedy M.P., Rovatti R., and Setti G. (eds.). Chaotic Electronics in Telecommunications. CRC Press. Boca Raton. FL, 2000. 464 pp.

³ Лукин К.А. Шумовая радиолокация миллиметрового диапазона // Радиофизика и электроника. 2008. Т. 13. Спец. выпуск. Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. С. 118-124.

⁴ Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Кижяева К.К., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М., Шигаев А.М. Сложная динамика многорезонаторных клистронных автогенераторов с запаздывающей обратной связью // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2002. Т. 10, № 5. С. 37-49.

⁵ Рыскин Н.М., Шигаев А.М. Сложная динамика двухрезонаторного клистрона-генератора с запаздывающей обратной связью // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 1. С. 72-81.

ставление с экспериментальными результатами показало, что модели в виде дифференциальных уравнений с запаздыванием хорошо описывают качественную картину поведения приборов. Однако такие модели не учитывают нелинейность скоростной модуляции в зазоре, что оправдано только для генераторов с низким КПД, а также самосогласованный характер взаимодействия электронов с полем в зазоре резонатора. Поэтому для достоверного количественного определения важных с практической точки зрения характеристик приборов, таких как выходная мощность, КПД, время переходного процесса и др., следует использовать более строгие математические модели, основанные на традиционных для СВЧ электроники методах «крупных частиц».

Если речь идет о генераторе одночастотных колебаний, автомодуляция и хаос выступают как паразитные эффекты, ограничивающие выходную мощность и КПД генератора. В работе⁶ при участии автора диссертации был предложен способ подавления автомодуляционных и хаотических режимов генерации в генераторах с ЗОС, являющийся развитием известного метода «управления хаосом». В последние годы проблема управления хаосом вызывает значительный интерес, в том числе в связи с перспективами практических приложений в различных областях науки и техники. Было изучено применение данного метода для подавления паразитной автомодуляции в различных системах с запаздыванием, в том числе в генераторе на основе двухрезонаторного клистрона⁷. Однако в данных работах исследование проводилось на основе упрощенных моделей типа систем дифференциальных уравнений с запаздыванием. Представляет очевидный интерес численное моделирование с использованием более строгих математических моделей на основе метода «крупных частиц».

Известно, что наиболее сильным типом хаотического поведения является грубый гиперболический хаос, когда странный аттрактор не содержит устойчивых периодических орбит и состоит только из траекторий седлового типа⁸, с хорошо определенными устойчивыми и неустойчивыми направлениями. Такие аттракторы обладают свойством грубости или так называемой структурной устойчивостью, что означает нечувствительность характера динамики системы и структуры аттрактора к вариациям параметров и функций, описывающих систему. Представляется, что это преимущество будет существенным для применения в системах радиолокации, передачи информации, электронного противодействия. С.П. Кузнецовым была предложена идея построения физических систем с аттракторами гиперболического типа и представлен пример радиотехнического устройства с таким аттрактором^{9,10}. Система состоит из двух связанных генераторов основной и удвоенной частот, которые становятся активными попеременно и передают друг другу возбуждение так,

⁶ Емельянов В.В., Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. Подавление автомодуляции в автогенераторе с запаздыванием при помощи методики управления хаосом // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 6. С. 719-725.

⁷ Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. Подавление автомодуляции в клистроне-генераторе с запаздывающей обратной связью при помощи методики управления хаосом // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 6. С. 741-750.

⁸ Кузнецов С.П. Динамический хаос. М.: Физматлит, 2005. 296 с.

⁹ Kuznetsov S.P. Example of a Physical System with a Hyperbolic Attractor of the Smale-Williams Type // Phys. Rev. Lett. 2005. Vol. 95. 144101.

¹⁰ Kuznetsov S.P. Hyperbolic Chaos: A Physicist's View. Higher Education Press: Beijing and Springer: Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2011. 320 pp.

что трансформация фазы колебаний за полный цикл работы системы описывается растягивающим отображением окружности или отображением Бернулли. В связи с этим представляет очевидный интерес распространить этот принцип на распределенные электронно-волновые системы с бесконечным числом степеней свободы. Как известно, гармоническая волна, распространяясь в нелинейной среде, обогащается гармониками, и различные спектральные составляющие могли бы играть роль связанных генераторов в сосредоточенных системах. В диссертации предлагается способ реализации этой идеи на основе генератора, состоящего из двух замкнутых в кольцо пролетных клистронов, содержащих резонаторы основной, удвоенной и утроенной частот. В результате появляется возможность генерации грубого, структурно устойчивого хаоса в СВЧ диапазоне. Указанные обстоятельства позволяют считать тему диссертации актуальной и важной для современной радиофизики.

Цель диссертационной работы состоит в развитии методов численного моделирования нестационарных нелинейных процессов и в выявлении основных закономерностей нелинейной динамики в генераторах клистронного типа с ЗОС.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **основные задачи**:

1. Разработка программы численного моделирования нелинейных нестационарных процессов в приборах клистронного типа на основе нестационарной теории возбуждения Л.А. Вайнштейна и метода «частиц в ячейке» для моделирования динамики электронного пучка.

2. Детальное численное исследование картины нелинейной динамики многорезонаторного клистрона-генератора с внешней ЗОС. Сопоставление с результатами, полученными для упрощенных моделей в виде дифференциальных уравнений с запаздыванием.

3. Численное моделирование подавления паразитных колебаний в многорезонаторном клистроне-генераторе с внешней ЗОС с помощью введения дополнительной цепи ЗОС. Выяснение возможностей повышения выходной мощности и КПД генератора. Сопоставление с результатами, полученными для упрощенных моделей в виде дифференциальных уравнений с запаздыванием.

4. Разработка схемы генератора структурно-устойчивых хаотических колебаний СВЧ диапазона на основе связанных пролетных клистронов. Теоретический анализ и численное моделирование генератора, проверка наличия основных атрибутов гиперболической динамики.

Методы исследования. В ходе выполнения диссертационной работы был использован спектр различных аналитических и численных методов. Методика численного моделирования нестационарных процессов в усилителях и генераторах клистронного типа строится на методе «частиц в ячейке» и на нестационарной теории возбуждения резонаторов Л.А. Вайнштейна¹¹. Также проводилось исследование упрощенных моделей в виде нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием. При этом использовался метод Рунге-Кутты

¹¹ Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973. 400 с.

4-го порядка, адаптированный для систем с запаздыванием¹². Анализ свойств колебательных режимов проводился с использованием широкого арсенала методов нелинейной динамики: расчет спектров, построение фазовых портретов, бифуркационных деревьев, карт динамических режимов, расчет спектра ляпуновских показателей. Показатели Ляпунова рассчитывались с использованием алгоритма Бенеттина, модифицированного для систем с запаздыванием¹³.

Положения, выносимые на защиту:

1. В четырехрезонаторном клистроне-генераторе с внешней запаздывающей обратной связью расстройка частот второго резонатора на 0.35% в меньшую сторону, а третьего — на 0.35% в большую сторону приводит к разрушению стационарных состояний, связанных с многократной перегруппировкой электронного пучка, к значительному увеличению выходной мощности в режиме насыщения, а также к генерации хаотических колебаний.

2. Использование дополнительной цепи запаздывающей обратной связи со специальным образом подобранными параметрами позволяет в многорезонаторном клистроне-генераторе повысить мощность стационарной одночастотной генерации более чем в 2 раза, а КПД — в 1.5 раза.

3. В системе двух замкнутых в кольцо пролетных клистронов, один из которых функционирует как умножитель частоты входного сигнала, а во втором клистроне происходит смещение выходного сигнала первого клистроны с последовательностью импульсов третьей гармоники, реализуется режим структурно устойчивого хаоса, обусловленный тем, что трансформация фазы высокочастотного заполнения меняется от импульса к импульсу в соответствии с итерациями хаотического отображения Бернулли.

Аргументированность, обоснованность и достоверность результатов диссертации. Достоверность полученных результатов обусловлена использованием хорошо апробированных аналитических и численных методов, обоснованным выбором параметров численных схем. Достоверность выводов также подтверждается соответствием результатов, полученных для моделей различных классов (моделирование методом «частиц в ячейке», упрощенные модели в виде систем дифференциальных уравнений и точечных отображений), соответствием результатов теоретического анализа и численного моделирования. В качестве тестовых расчетов воспроизводятся известные из литературы достоверные общепризнанные результаты.

Научная новизна работы. Основные результаты диссертации являются новыми и получены впервые. В частности, были решены следующие новые задачи:

1. Разработана программа численного моделирования нестационарных процессов в приборах клистронного типа. Программа использует нестационарную теорию возбуждения Л.А. Вайнштейна и метод «частиц в ячейке» для мо-

¹² Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М.: Мир, 1990. 512 с.

¹³ Балякин А.А., Рыскин Н.М. Особенности расчета спектров показателей Ляпунова в распределенных автоколебательных системах с запаздывающей обратной связью // Изв. вузов. ПНД. 2007. Т. 15, № 6. С. 3-21.

делирования динамики электронного потока. Алгоритм программы адаптирован под компьютеры с многоядерным процессором, что значительно сокращает время расчета. Программа позволяет корректно моделировать такие нестационарные процессы, как усиление сигналов с произвольным спектральным составом, паразитное самовозбуждение в генераторах с ЗОС, генерация хаотических сигналов. Программа использовалась при моделировании динамики двухкаскадного клистронного генератора миллиметрового диапазона, состоящего из двух замкнутых в кольцо пролетных двухрезонаторных клистронов¹⁴.

2. На основе разработанной программы подробно исследована картина режимов генерации четырехрезонаторного клистрона-генератора с внешней ЗОС при идентичной и неидентичной настройках собственных частот промежуточных резонаторов. В целом результаты моделирования подтверждают качественную картину сложной динамики генератора, полученную ранее на основе приближенных математических моделей в виде дифференциальных уравнений с запаздыванием. Вместе с тем, в отличие от предыдущих работ, результаты диссертации позволяют рассчитать достоверные количественные значения выходных параметров генератора, важных с практической точки зрения, и дать физическое объяснение особенностям сложной динамики. В частности, показано, что переход к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода автомодуляции в многорезонаторном клистроне-генераторе развивается только при неидентичной настройке собственных частот промежуточных резонаторов, когда по мере увеличения тока электронного пучка не происходит перехода к стационарным режимам генерации, обусловленного сильной перегруппировкой электронного пучка.

3. Проведено численное моделирование стабилизации одночастотного режима генерации в многорезонаторном клистроне-генераторе с дополнительной цепью ЗОС. Определены оптимальные значения параметров дополнительной цепи ЗОС. Результаты моделирования свидетельствуют о возможности увеличить пороговое значение тока пучка, при котором возникает автомодуляция, в 2 раза повысить выходную мощность и в 1.5 раза увеличить электронный КПД генератора в одночастотном режиме по сравнению с генератором с единственной цепью ЗОС.

4. Впервые предложена схема генератора грубого гиперболического хаоса СВЧ диапазона на основе связанных пролетных клистронов, соединенных в кольцевую цепь. Развита и исследована математическая модель генератора в виде двумерного точечного отображения и системы дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом. Показано, что реализующийся хаотический аттрактор обладает свойством грубости или так называемой структурной устойчивостью, что проявляется в нечувствительности структуры аттрактора и положительного показателя Ляпунова к вариациям параметров системы.

Научно-практическая значимость. Результаты диссертации развивают и дополняют картину нелинейной динамики генераторов с запаздывающей об-

¹⁴ Емельянов В.В., Яковлев А.В., Рыскин Н.М. Компьютерное моделирование двухкаскадного клистронного генератора миллиметрового диапазона // Журнал технической физики. 2013. Т. 83, вып. 7. С. 129-134.

ратной связью на основе пролетных многорезонаторных клистронов. Установлено, что сложная динамика в подобных приборах имеет место только при неидентичной настройке собственных частот промежуточных резонаторов. Результаты исследования подавления автомодуляции в многорезонаторном клистроне-генераторе позволяют определить оптимальные параметры дополнительной цепи запаздывающей обратной связи, при которых достигается повышение мощности и коэффициента полезного действия в режиме стационарной одночастотной генерации.

Принцип построения физических систем с аттракторами гиперболического типа распространен на распределенные электронно-волновые системы с бесконечным числом степеней свободы. Поскольку такие аттракторы обладают свойством грубости, предложенная конструкция генератора СВЧ диапазона на основе связанных в кольцо пролетных клистронов может найти применение в системах радиолокации и передачи информации, использующих хаотические сигналы.

Разработанная программа численного моделирования нестационарных процессов в генераторах на основе многорезонаторных клистронов может найти широкое применение на научно-производственных предприятиях радиоэлектронной промышленности, специализирующихся на разработке современных вакуумных усилителей и генераторов на основе многорезонаторных пролетных клистронов, которые широко используются в системах радиолокации, телекоммуникации, спектроскопии, генераторах помех. Программа также представляет интерес для использования в учебном процессе в вузах, готовящих специалистов в области радиофизики и электроники СВЧ. Достоинствами программы являются простота использования и высокая производительность на компьютерах с многоядерным процессором.

Личный вклад. Все результаты, включенные в диссертацию, получены лично соискателем. Им выполнен теоретический анализ исследуемых математических моделей, разработаны все используемые программы компьютерного моделирования, проведены все численные расчеты. Постановка задач, обсуждение и интерпретация полученных результатов осуществлялись совместно с научным руководителем, а также с профессором, д.ф.-м.н. Кузнецовым С.П. (материалы гл. 3).

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались на научных семинарах факультета нелинейных процессов СГУ, представлялись на школах-конференциях «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2007-2011 гг.), II-VI конференциях молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2006-2011 гг.), VIII и IX международных школах «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2007, 2010 гг.), XIV, XV зимних школах-семинарах по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 2009, 2012 гг.), международной школе-семинаре «Статистическая физика и информационные технологии» (Саратов, 2009 г.), III международной конференции «Frontiers of Nonlinear Physics 2007» (Нижний Новгород, 2007 г.).

Результаты диссертации использовались при выполнении НИР, поддержанных аналитической ведомственной целевой программой Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № 2.1.1/1738), проектами РФФИ (гранты №№ 06-02-16773а, 09-02-00707а, 12-02-00541а, 12-02-31493-мол_а).

По результатам диссертации опубликовано 16 работ, из них 4 статьи в российских и международных журналах, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций, и 12 публикаций в сборниках тезисов докладов и материалов конференций. На разработанную программу получено свидетельство о государственной регистрации. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитированной литературы, включающего 109 наименований, изложена на 172 страницах, содержит 86 рисунков и 5 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, положения, выносимые на защиту, научная новизна и научно-практическая значимость полученных результатов.

В **Главе 1** приводится методика численного моделирования нестационарных процессов в усилителях и генераторах клистронного типа, основанная на традиционном для СВЧ электроники методе «частиц в ячейке» и нестационарной теории возбуждения резонаторов Л.А. Вайнштейна. В п. 1.1 излагается устройство и принцип действия многорезонаторных пролетных клистронов. В п. 1.2 приводятся основные уравнения, описывающие нестационарную динамику приборов клистронного типа, и методы их численного решения. В п. 1.2.1 описываются нестационарные уравнения возбуждения резонаторов током медленно меняющейся амплитуды. Поля в резонаторах представляются в виде квазимонохроматических колебаний с комплексными амплитудами $C_s(t)$ и несущей частотой ω , близкой к собственной частоте ω_s . Комплексная амплитуда $C_s(t)$ удовлетворяет уравнению возбуждения

$$\frac{dC_s}{dt} + \left(i\Delta\omega + \frac{\omega_s}{2Q_s} \right) C_s = -\frac{1}{2N_s} \int_V \mathbf{j}_\omega \mathbf{E}_s dV,$$

где \mathbf{j}_ω — комплексная амплитуда тока пучка, возбуждающего резонатор, N_s — норма колебания, функция E_s описывает распределение поля в зазоре резонатора, $\Delta\omega = \omega_s - \omega$ — расстройка, Q_s — добротность. Численное решение уравнений возбуждения осуществляется методом «предиктор-корректор» второго порядка точности. В п. 1.2.2 описывается метод «частиц в ячейке» для моделирования динамики электронного пучка. Предполагается, что электронный пучок полностью сфокусирован внешним продольным магнитным полем и дви-

жется только вдоль продольной оси. В одномерном приближении уравнения движения частиц записываются в виде

$$\frac{dx_m}{dt} = v_m,$$

$$\frac{dp_m}{dt} = -\eta(E(x_m) + E_{nz}(x_m)).$$

Здесь p_m , v_m и x_m — импульс, скорость и координата частицы с номером m , соответственно, η — удельный заряд электрона, $E(x_m)$ и $E_{nz}(x_m)$ — напряженности ВЧ поля резонатора и поля сил пространственного заряда, действующих на частицу. Выражение для поля сил пространственного заряда записывается в предположении, что крупные частицы представляют собой тонкие заряженные диски. В этом случае численная модель учитывает ограниченность электронного пучка в поперечном направлении. Подобные численные схемы принято называть 1.5-мерными.

В п. 1.3 описывается интерфейс разработанной программы численного моделирования, приводится схема разделения алгоритма расчета на три потока и проводится анализ ее быстродействия на компьютере с многоядерным процессором. Показано, что использование принципа многопоточного параллельного программирования позволяет сократить время расчета в два раза.

В п. 1.4 приводятся результаты тестовых расчетов. В п. 1.4.1 исследуются выходные характеристики двухрезонаторного пролетного клистрона-усилителя. В п. 1.4.2 определяются условия самовозбуждения двухрезонаторного клистрона-генератора с внешней ЗОС. Численные результаты полностью согласуются с аналитической теорией.

В п. 1.4.3 приводятся результаты численного моделирования выходных характеристик четырехрезонаторного клистрона-усилителя с параметрами, близкими к экспериментальному образцу¹⁵. Определена оптимальная настройка собственных частот промежуточных резонаторов, при которой максимальная

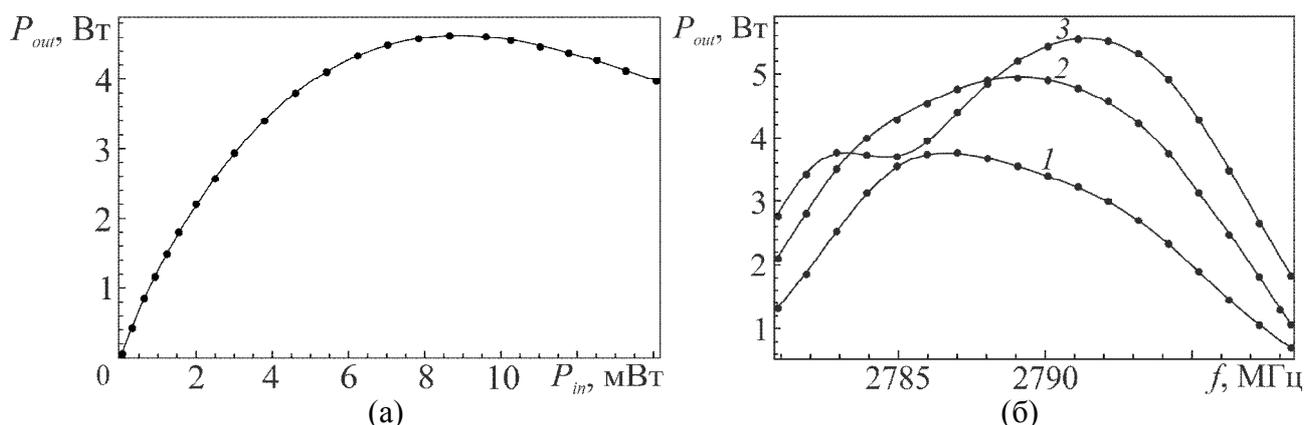


Рис. 1. (а) Амплитудная характеристика четырехрезонаторного клистрона. (б) АЧХ клистрона при различных уровнях входной мощности: 1 — линейный режим, 2 — режим насыщения, 3 — режим за насыщением.

¹⁵ Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М. Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью // ЖТФ. 2003. Т. 73, № 7. С. 105-110.

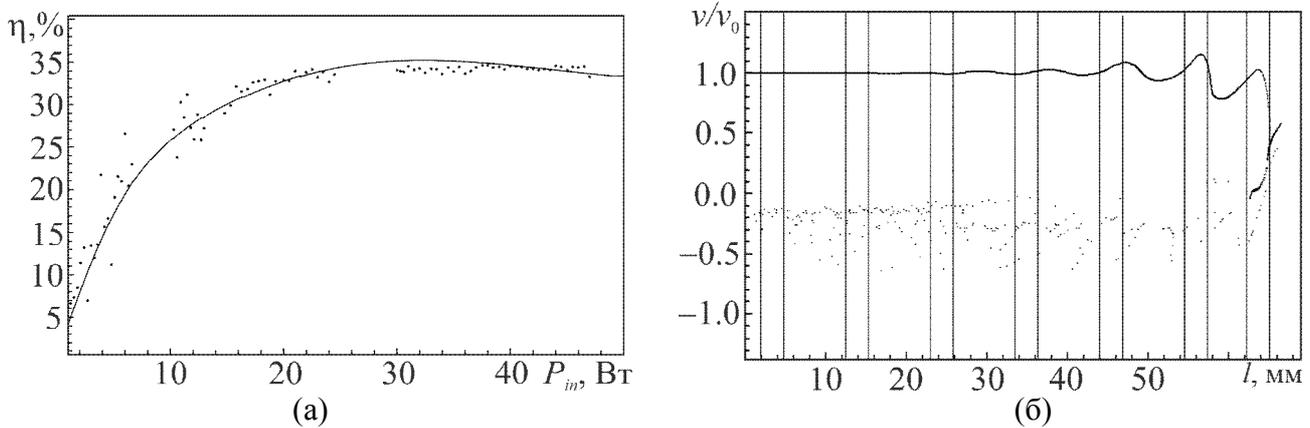


Рис. 2. Результаты моделирования для мощного клистрона, разрабатываемого ФГУП «НПП «Торий». (а) Зависимость КПД от мощности входного сигнала: Сплошная кривая — результаты моделирования по разработанной программе, кружки — результаты¹⁶. (б) Фазовый портрет электронного потока в режиме самовозбуждения.

выходная мощность клистрона равна мощности клистрона с идентично настроенными собственными частотами резонаторов, а рабочая полоса частот на уровне -3 дБ в режиме насыщения увеличилась более чем в 2 раза. На рис. 1а изображена амплитудная характеристика, т.е. зависимость выходной мощности клистрона от входной. На рис. 1б представлена трансформация АЧХ прибора, т.е. зависимости выходной мощности от частоты входного сигнала, при изменении уровня мощности входного сигнала. Кривая 1 соответствует линейному режиму работы усилителя, кривая 2 — режиму насыщения, когда на резонансной частоте имеет место оптимальное группирование. Дальнейшее увеличение входной мощности вызывает на резонансной частоте перегруппирование электронов, приводящее к провалу на АЧХ вблизи резонанса (кривая 3). Подобное поведение АЧХ хорошо согласуется с предсказаниями теории.

В п. 1.4.4 рассматривается мощный семирезонаторный усилительный клистрон 3-х сантиметрового диапазона, который в настоящее время разрабатывается во ФГУП «НПП «Торий», г. Москва¹⁶. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с данными, полученными во ФГУП «НПП «Торий» по 2.5-мерной программе численного моделирования (см. рис. 2а). Определены параметры входного сигнала, при котором возникает возвратное движение электронов, приводящее к самовозбуждению усилителя. На рис. 2б представлен соответствующий фазовый портрет электронного пучка, т.е. зависимость скорости частиц от координаты. Данный пример наиболее ярко демонстрирует одно из достоинств разработанной программы, состоящее в возможности моделирования возвратного движения электронов.

В **Главе 2** проведено детальное численное исследование картины динамических режимов четырехрезонаторного клистрона-генератора с внешней ЗОС при идентичной и неидентичной настройках частот промежуточных резонаторов и реализован метод подавления автомодуляции в таком генераторе при помощи введения дополнительной цепи ЗОС.

¹⁶ Макеев А.Э., Комаров Д.А., Морев С.П. Исследование влияния тормозящего ВЧ поля в зазоре резонатора на структуру сгруппированного электронного потока мощного СВЧ усилителя // Материалы XV международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. Саратов, 2012. С. 76.

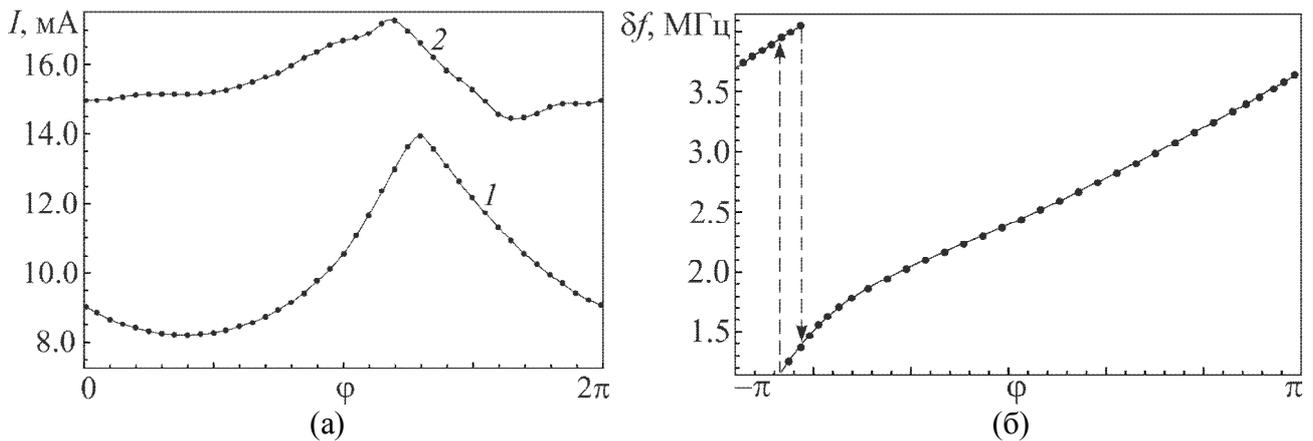


Рис. 3. Граница самовозбуждения I и кривая порога возникновения автомодуляции 2 (а). Зависимость отстройки частоты генерации от набега фазы φ в линии ЗОС (б).

В п. 2.1 представлены результаты численного моделирования динамики четырехрезонаторного клистрона-генератора с внешней ЗОС, полученные с помощью разработанной программы. Сначала рассматривается случай идентичной настройки частот резонаторов. На рис. 3а приведены граница самовозбуждения (I) и порог возникновения автомодуляции (2) на плоскости управляющих параметров «набег фазы в линии ЗОС φ — ток электронного пучка I ». Кривые (I) и (2) имеют периодический характер по φ , т.е. на плоскости ($\varphi - I$) имеется система дискретно расположенных зон генерации, расширяющихся с ростом тока электронного пучка. Вблизи границ зон генерации наблюдается бистабильность, т.е. при одних и тех же значениях параметров в зависимости от начальных условий устанавливаются колебания на одной из двух соседних собственных мод. При плавном изменении фазы φ в этой области происходят жесткие переходы с одной собственной моды на другую, сопровождающиеся гистерезисом. Наличие гистерезиса отчетливо видно на рис. 3б, где представлена зависимость частоты генерации от φ , построенная при движении на плоскости ($\varphi - I$) чуть выше кривой I . Область гистерезиса заключена на рисунке между штриховыми вертикальными линиями. Полученная картина носит общий характер для автогенераторов с запаздыванием. На рис. 4 представлена зависимость выходной мощности генератора от тока пучка. Для нестационарных режимов генерации, где выходная мощность осциллирует, приведены значения мощности, усредненные по достаточно длительному промежутку времени. Римскими цифрами обозначены разные режимы генерации прибора. В области I устанавливается режим стационарной одночастотной генерации. При росте тока пучка он сменяется режимом периодической автомодуляции (область II). Автомодуляция возникает мягко в соответствии с амплитудным механизмом, что согла-

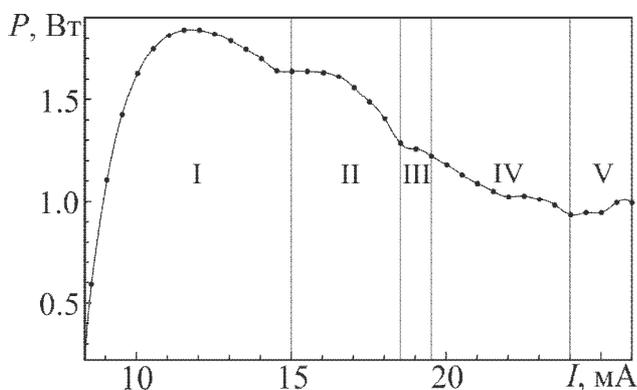


Рис. 4. Зависимость среднего значения выходной мощности от тока пучка. I, III, V — режимы стационарной генерации, II, IV — режимы автомодуляции.

режимов генерации, где выходная мощность осциллирует, приведены значения мощности, усредненные по достаточно длительному промежутку времени. Римскими цифрами обозначены разные режимы генерации прибора. В области I устанавливается режим стационарной одночастотной генерации. При росте тока пучка он сменяется режимом периодической автомодуляции (область II). Автомодуляция возникает мягко в соответствии с амплитудным механизмом, что согла-

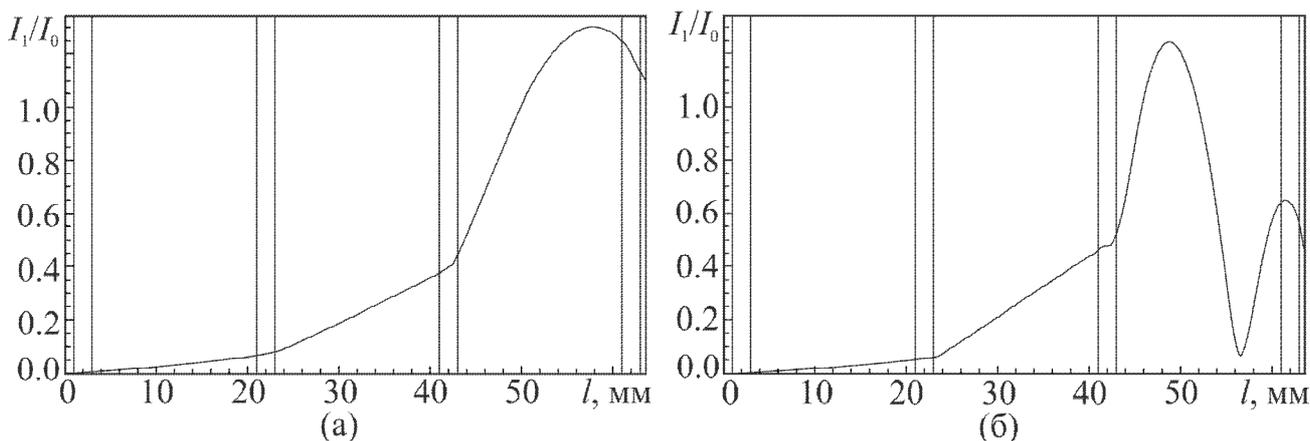


Рис. 5. Пространственные распределения первой гармоники сгруппированного тока вдоль длины прибора в режимах стационарной одночастотной генерации, построенные при разных значениях тока пучка I : 14 мА (а), 18.8 мА (б).

суется с результатами предшествующих работ. При дальнейшем увеличении тока пучка вновь восстанавливается стационарный одночастотный режим генерации, но уже с другим пространственным распределением первой гармоники сгруппированного тока.

На рис. 5 представлены распределения первой гармоники тока в режимах одночастотной генерации. В области I перегруппировка электронного пучка возникает лишь перед выходным резонатором (рис. 5а), в области III электронные сгустки успевают практически полностью разгруппироваться, после чего начинается образование вторичных электронных сгустков. При дальнейшем увеличении тока пучка можно наблюдать режимы, в которых появляются три (область V на рис. 4) и более максимума первой гармоники. Таким образом, при синхронной настройке резонаторов типичный для клистронных автогенераторов с внешней ЗОС каскад бифуркаций удвоения периода автомодуляции по мере увеличения тока электронного пучка не развивается. Его появлению препятствует очень сильная перегруппировка электронного пучка, приводящая к появлению высших стационарных состояний с двумя, тремя и более максимумами первой гармоники сгруппированного тока. Среднее значение выходной

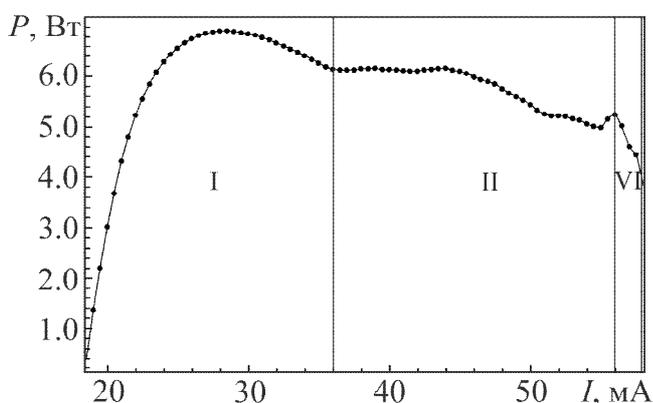


Рис. 6. Зависимость среднего значения выходной мощности от тока пучка. I — режим стационарной генерации, II — режим автомодуляции, VI — хаотический режим. Пунктир — порог бифуркаций удвоения периода автомодуляции.

мощности в таких режимах резко падает. Значительного увеличения выходной мощности удастся добиться, вводя частотную расстройку промежуточных резонаторов, если при этом расстраивать второй резонатор на 0.35 % в сторону меньших, а третий — на 0.35 % в сторону больших частот. В этом случае картина примерно аналогична представленной на рис. 3а, однако бифуркационные значения тока пучка оказываются приблизительно в два раза больше, что, очевидно, объясняется уменьшением коэффициента усиления клистрона

при введении частотной расстройки. Введение частотной расстройки резонаторов приводит, вместе с тем, к сдвигу насыщения мощности в область бóльших токов и, соответственно, к значительному увеличению выходной мощности генератора (см. рис. 6). С увеличением тока пучка возникает автомодуляция, а затем каскад бифуркаций удвоения периода автомодуляции. Выходная мощность генератора при этом уменьшается, однако гораздо медленнее, чем в случае синхронной настройки резонаторов. Это можно объяснить тем, что частотная расстройка резонаторов препятствует перегруппировке электронов и, следовательно, образованию высших горбов первой гармоники тока. Наконец, при $I \approx 57.2$ мА последовательность бифуркаций удвоения периода автомодуляции заканчивается переходом к хаосу.

В п. 2.2 описывается методика подавления паразитных колебаний в генераторах с внешней ЗОС, основанная на введении дополнительной цепи ЗОС. Показано, каким образом следует выбирать параметры управляющей цепи ЗОС, чтобы добиться подавления автомодуляции. В п. 2.3 представлены результаты численного моделирования подавления автомодуляции в четырехрезонаторном клистроне-генераторе, которые показывают, что предлагаемый метод позволяет подавить автомодуляцию и стабилизировать одночастотные колебания в широком диапазоне параметров. На рис. 7 представлены зависимости выходной мощности от тока электронного пучка. Рис. 7а соответствует генератору с синхронной настройкой частот резонаторов, рис. 7б — генератору с несинхронной настройкой частот резонаторов. Нижние кривые отвечают случаю без управления, верхние — с управлением. Данные, показанные квадратами, соответствуют усредненной по времени выходной мощности в режиме автомодуляции. Видно, что при использовании дополнительной цепи ЗОС диапазон устойчивости режима одночастотной генерации расширяется в 1.5 раза, при этом максимальное значение мощности одночастотной генерации увеличивается в 2 раза, а КПД — в 1.5 раза по сравнению с генератором без управления. Также показано, что метод является грубым, он устойчив к небольшим вариациям параметров управляющей цепи ЗОС.

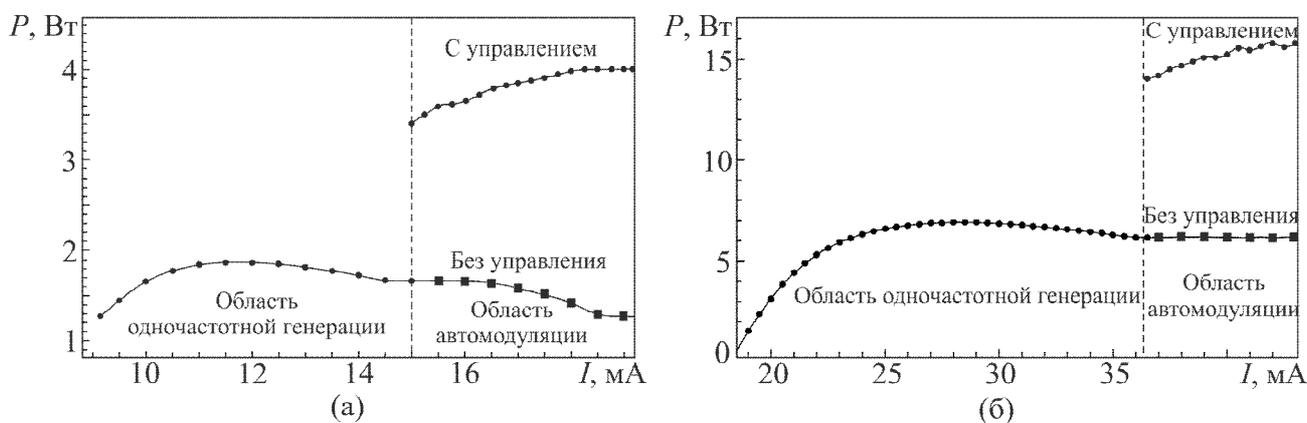


Рис. 7. Зависимости среднего значения выходной мощности от тока электронного пучка при синхронной (а) и несинхронной (б) настройке частот резонаторов. Нижние кривые отвечают случаю без управления, верхние — с управлением. Кружки соответствуют стационарному режиму генерации, квадраты — режиму автомодуляции.

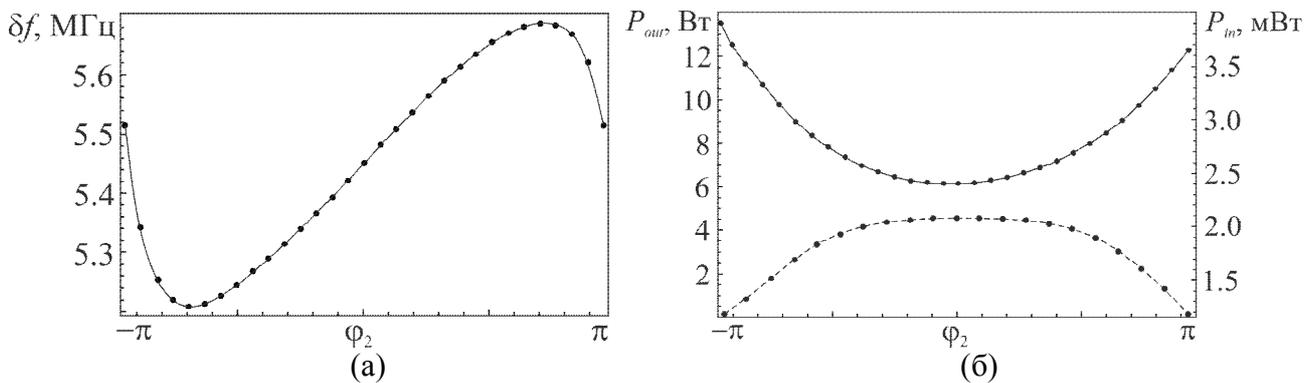


Рис. 8. Зависимость отстройки частоты генерации от набега фазы в управляющей цепи ЗОС (а). Зависимости мощности во входном (пунктирная линия, правая ось) и выходном (сплошная линия, левая ось) резонаторах от набега фазы в управляющей цепи ЗОС (б).

На рис. 8а представлена зависимость частоты стабилизированной одночастотной генерации от набега фазы в управляющей цепи ЗОС. Видно, что частота изменяется плавно, в центре зоны генерации изменение частоты подчиняется линейному закону. На рис. 8б представлены зависимости мощности во входном (пунктир) и выходном (сплошная линия) резонаторах от набега фазы в управляющей цепи ЗОС. Видно, что максимальное увеличение мощности выходного сигнала достигается не в центре зоны генерации, где мощность во входном резонаторе клистрона максимальна, а на ее границах, где мощность во входном резонаторе минимальна. Физически это можно объяснить тем, что при большом превышении порога генерации увеличение мощности входного сигнала приводит к сильной перегруппировке электронного пучка и, следовательно, к падению выходной мощности. При отстройке от центра зоны генерации частота смещается от собственной частоты входного резонатора, и мощность во входном резонаторе падает. Соответственно это приводит к уменьшению степени перегруппировки электронного пучка и к увеличению выходной мощности.

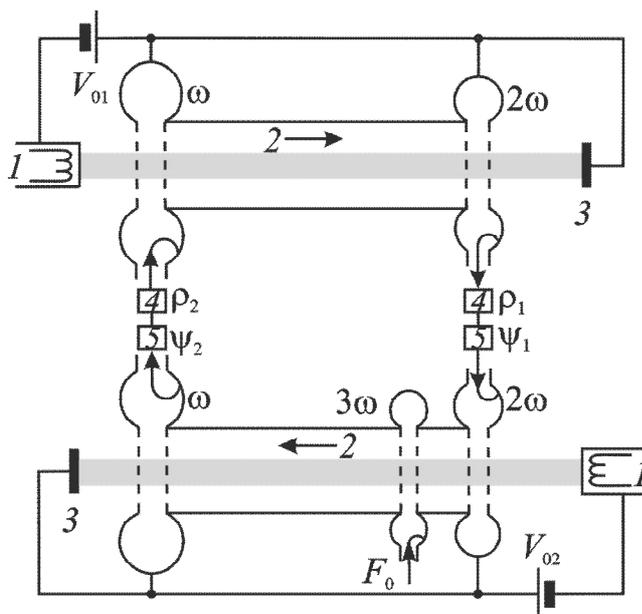


Рис. 9. Принципиальная схема генератора. 1 — электронные пушки, 2 — электронные пучки, 3 — коллекторы, 4 — аттенюаторы, 5 — фазовращатели.

В **Главе 3** рассматривается генератор структурно устойчивого хаоса сверхвысокочастотного диапазона на основе двух замкнутых в кольцо пролетных клистронов, и проверяются основные атрибуты гиперболической динамики. П. 3.1 носит обзорный характер. В п. 3.2 предлагается схема генератора хаотических колебаний на основе замкнутых в кольцо пролетных клистронов, содержащих резонаторы на первой, второй и третьей гармониках (рис. 9). Первый клистрон функционирует как умножитель частоты и фазы входного сигнала. Во втором клистроне происходит смешение выходного сигнала первого

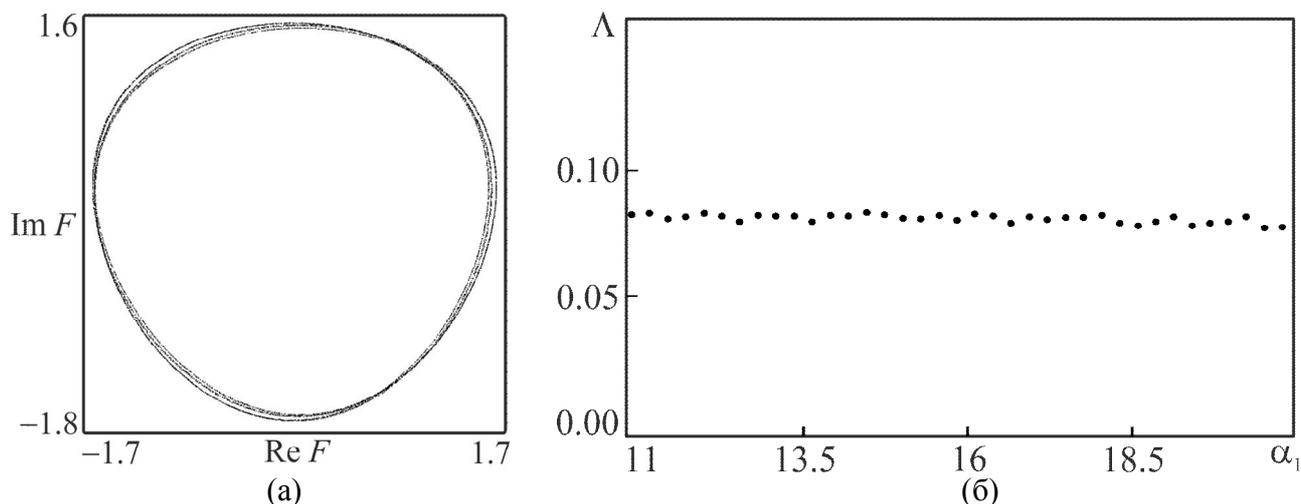


Рис. 10. Проекция аттрактора на плоскость комплексной переменной $\text{Re } F - \text{Im } F$ (а). Зависимость старшего показателя Ляпунова от параметра возбуждения первого клистрона (б).

клистрона с опорным сигналом, который представляет собой поступающую от внешнего источника последовательность радиоимпульсов с заполнением на частоте третьей гармоники. В выходном резонаторе второго клистрона выделяется сигнал на разностной частоте, который затем поступает во входной резонатор первого клистрона, что замыкает цепь обратной связи.

В п. 3.3 представлен подробный вывод математической модели генератора в виде системы дифференциальных уравнений с запаздыванием. В п. 3.4 приводятся результаты численного моделирования упрощенной модели генератора в виде точечного отображения. В п. 3.5 приводятся результаты численного моделирования исходной модели генератора в виде системы дифференциальных уравнений с запаздыванием. Результаты численного моделирования точечного отображения и системы дифференциальных уравнений с запаздыванием аналогичны и показывают, что в достаточно большой области управляющих параметров в системе реализуется грубый структурно устойчивый хаос. В этом случае генерируемый сигнал будет иметь вид последовательности импульсов, период следования которых равен периоду следования импульсов опорного сигнала, а фаза высокочастотного заполнения хаотически меняется от импульса к импульсу в соответствии с итерациями отображения Бернулли. Аттрактор отображения Пуанкаре имеет топологию гиперболического аттрактора типа Смейла-Вильямса (см. рис. 10а). Старший показатель Ляпунова ведет себя гладким образом, без провалов в область отрицательных значений (см. рис. 10б). На основании результатов численного моделирования высказывается предположение о гиперболической природе хаотического аттрактора. Моделирование динамики генератора на основе более строгой математической модели, аналогичной использовавшейся в гл. 1,2, подтвердило генерацию структурно устойчивого хаоса и позволило получить более достоверные оценки выходных характеристик генератора. В частности, было показано, что ширина спектра в хаотическом режиме относительно невелика (порядка 20 МГц), однако он является гораздо более однородным, чем в генераторе на основе многорезонаторного клистрона с внешней ЗОС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана программа численного моделирования нелинейных нестационарных процессов в усилителях и генераторах на основе многорезонаторных пролетных клистронов. Программа основана на нестационарной теории возбуждения резонаторов Л.А. Вайнштейна и методе «частиц в ячейке» для моделирования динамики электронного пучка. Программа позволяет моделировать усиление и генерацию сигналов со сложным спектральным составом, рассчитывать важные с практической точки зрения характеристики прибора, такие как выходная мощность, КПД, время переходного процесса и т.д. Она адаптирована под компьютеры с многоядерным процессором, ее алгоритм одновременно задействует ресурсы до трех ядер процессора. Ее отличает простота использования и высокая скорость расчета. На разработанную программу получено свидетельство о государственной регистрации.

2. Проведены расчеты выходных характеристик мощного семирезонаторного клистронного усилителя 3-х сантиметрового диапазона, разрабатываемого во ФГУП «НПП «Торий», г. Москва. Обнаружено, что при большой мощности входного сигнала на частотах вблизи максимума АЧХ наблюдается возвратное движение электронов, приводящее к самовозбуждению усилителя, что наглядно подтверждает достоинство нестационарного подхода, положенного в основу алгоритма. Результаты расчетов хорошо согласуются с данными, полученными во ФГУП «НПП «Торий» с помощью полностью электромагнитной 2.5-мерной программы.

3. Исследованы основные свойства колебательных режимов четырехрезонаторного клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью. Показано, что при идентичной настройке собственных частот промежуточных резонаторов классический для генераторов на основе пролетных клистронов сценарий перехода к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода автомодуляции не развивается, а происходит переход к стационарным режимам генерации, в которых распределение первой гармоники тока вдоль системы имеет два и более максимума. Мощность генерации в таких режимах резко падает. Это связано с сильной перегруппировкой электронного пучка, наступающей уже при малых значениях тока пучка. Расстройка частот промежуточных резонаторов сдерживает механизм перегруппировки пучка и позволяет отодвинуть насыщение в область больших токов. В результате зависимость выходной мощности от тока пучка носит более плавный характер, а максимальная выходная мощность значительно возрастает по сравнению со случаем синхронной настройки. По мере увеличения тока пучка наблюдается последовательность бифуркаций удвоения периода автомодуляции и переход к хаосу. Результаты численного моделирования качественно согласуются с результатами, полученными ранее в рамках упрощенных математических моделей в виде дифференциальных уравнений с запаздыванием.

4. Показана возможность применения предложенного ранее метода управления хаосом для подавления автомодуляции в четырехрезонаторном клистроне-генераторе с запаздывающей обратной связью. Метод основан на

введении дополнительной цепи ЗОС со специальным образом подобранными параметрами. Результаты численного моделирования показывают, что метод позволяет в 1.5 раза расширить диапазон значений тока электронного пучка, в котором режим одночастотной генерации устойчив; при этом максимальная мощность одночастотной генерации увеличивается более чем в 2 раза, а КПД — в 1.5 раза по сравнению с генератором без управления.

5. Принцип построения физических систем, обладающих аттракторами гиперболического типа, распространен на распределенные волновые системы с бесконечным числом степеней свободы. Подход основан на взаимодействии между основной и высшими гармониками сигнала, распространяющегося в нелинейной среде. Предложена конструкция генератора хаотических колебаний сверхвысокочастотного диапазона на основе двух замкнутых в кольцо пролетных клистронов, содержащих резонаторы первой, второй и третьей гармоник. Первый клистрон осуществляет удвоение частоты и фазы входного сигнала. Во втором клистроне происходит смешение сигнала второй гармоники с опорным сигналом в виде периодической последовательности импульсов с заполнением на частоте третьей гармоники и последующее выделение сигнала на разностной частоте. Период следования импульсов опорного сигнала выбирается равным времени прохождения сигнала по кольцу обратной связи. Результаты численного моделирования показывают, что в достаточно большой области управляющих параметров в системе реализуется грубый структурно устойчивый хаос. Генерируемый сигнал представляет собой последовательность импульсов со случайно меняющейся фазой и демонстрирует основные признаки гиперболического хаоса. Аттрактор отображения Пуанкаре имеет топологию гиперболического аттрактора Смейла–Вильямса, типичного для физических систем с гиперболической динамикой. Старший показатель Ляпунова зависит от параметров системы гладким образом без провалов в область отрицательных значений, присутствующих обычно в случае негиперболической хаотической динамики.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Емельянов В.В., Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. Подавление автомодуляции в автогенераторе с запаздыванием при помощи методики управления хаосом // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 6. С. 719-725.
2. Емельянов В.В., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Генератор гиперболического хаоса на основе связанных пролетных клистронов // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, № 16. С. 71-78.
3. Emel'yanov V.V., Kuznetsov S.P., Ryskin N.M. Hyperbolic chaos in the klystron-type microwave vacuum tube oscillator // Chaos. 2010. Vol. 20, No. 4, 043104.
4. Емельянов В.В. Численное моделирование нелинейной динамики многорезонаторного клистронного генератора с запаздывающей обратной связью методом «частиц в ячейке» // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 2. С. 72-82.
5. Емельянов В.В. Генератор хаотических колебаний на основе связанных пролетных клистронов // Материалы научной школы-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2008». Саратов, 29, 31 октября, 5-8 ноября 2008 г. Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2009. С. 140-143.
6. Емельянов В.В. Генератор хаоса с гиперболическим аттрактором на основе системы связанных пролетных клистронов // Статистическая физика и информационные технологии: Материалы Международной школы-семинара «StatInfo-2009». Саратов, Россия, 2-5 июня 2009 г. Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2009. С. 123-126.
7. Емельянов В.В. Численное моделирование генерации гиперболического хаоса в системе связанных пролетных клистронов // Материалы научной школы-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых – 2009». Саратов: ООО ИЦ «Наука», 2010. С. 10-13.
8. Emel'yanov V.V., Kuznetsov S.P., Ryskin N.M. Generation of Hyperbolic Chaos in the System of Coupled Klystrons // IEEE Int. Vacuum Electronic Conference. IVEC 2010, May 18-20, 2010. Monterey, California, USA. P. 131-132.
9. Emelyanov V.V., Ryskin N.M. Time-Domain PIC-Modeling of the Multiple Cavity Klystron Oscillator with Delayed Feedback // IEEE Int. Vacuum Electronic Conference. IVEC 2012, April 24-26, 2012. Monterey, California, USA. P. 51-52.
10. Емельянов В.В., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Генератор гиперболического хаоса СВЧ диапазона на основе связанных пролетных клистронов // Материалы XIV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. Саратов: Изд. ц. «РАТА», 2009. С. 43.
11. Емельянов В.В., Рыскин Н.М. Гиперболический хаос в связанных пролетных клистролах // Материалы IX Международной школы «Хаотические автоколебания и образование структур». Саратов, 4-9 октября 2010 г. Саратов, 2010. С. 87.
12. Емельянов В.В., Рыскин Н.М. Стабилизация одночастотных режимов генерации в четырехрезонаторном пролетном клистроне–генераторе // Материалы XV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. Саратов: Изд. ц. «РАТА», 2012. С. 42.
13. Емельянов В.В., Рыскин Н.М. Программа численного моделирования нелинейных нестационарных процессов в многорезонаторных пролетных клистролах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 201261108. 24 января 2012 г.

Научное издание

ЕМЕЛЬЯНОВ Валерий Валерьевич

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА АВТОГЕНЕРАТОРОВ
С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ НА ОСНОВЕ МНОГОРЕЗОНАТОРНЫХ
ПРОЛЕТНЫХ КЛИСТРОНОВ

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат

Подписано в печать «__» апреля 2013 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16.
Тираж 120 экз. Заказ № 31-Т

Отпечатано с готового оригинал-макета
Типография СГУ
410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, 112а, корпус 8