

На правах рукописи



ФРОЛОВ Никита Сергеевич

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ, СИНХРОНИЗАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ
СИГНАЛОВ В НИЗКОВОЛЬТНОМ ВИРКАТОРЕ И ВИРТОДЕ

01.04.03 – Радиофизика
01.04.04 – Физическая электроника

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2015

Работа выполнена на кафедре электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета.

Научные руководители:

Храмов Александр Евгеньевич, д.ф.–м.н., профессор, ведущий научный сотрудник НОЦ “Нелинейная динамика сложных систем” ФБГОУ ВПО “Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.”

Куркин Семен Андреевич, к.ф.–м.н., доцент кафедры открытых систем ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”

Официальные оппоненты:

Комаров Дмитрий Александрович, д.т.н., доцент, начальник отдела ФГУП “НПП “ТОРИЙ”, г. Москва

Прохоров Михаил Дмитриевич, д.ф.–м.н., доцент, заведующий лабораторией Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие АО “НПП “Алмаз”, г. Саратов

Защита состоится “24” июня 2015 г. в 15 часов 30 минут в Большой физической аудитории III корпуса СГУ на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 по специальностям 01.04.03 и 01.04.04 в Саратовском государственном университете (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке СГУ (г. Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан “7” мая 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследуемой проблемы. Изучение нестационарных колебательных и волновых процессов в электронных системах, в которых потоки заряженных частиц взаимодействуют с электромагнитными полями, продолжает оставаться важной фундаментальной задачей современной радиофизики и физической электроники, поскольку она тесно связана с проблемами оптимизации характеристик существующих и разработки новых приборов и устройств вакуумной и плазменной электроники СВЧ и ТГц диапазонов¹. Не менее важной современной задачей является проблема управления сложным поведением распределенных автоколебательных систем, демонстрирующих сложные колебательные режимы. Особый интерес здесь вызывает изучение распределенных активных сред физики плазмы и СВЧ электроники, поскольку подобные активные среды являются классическими примерами распределенных нелинейных систем со сложной пространственно-временной динамикой². Интерес к ним связан как с важностью описания колебательных процессов в электронно-волновых средах для современной электроники больших мощностей, так и с тем, что для них хорошо развиты методы экспериментального исследования, что делает подобные системы физической электроники удобным объектом для апробации различных методов и подходов к управлению сложной пространственно-временной динамикой, развиваемых в современной радиофизике³.

Одними из важных и интересных объектов исследований в электронике больших мощностей являются приборы с виртуальным катодом (так называемые виркатеры), в пространстве дрейфа которых под влиянием полей пространственного заряда (собственных высокочастотных полей) электронных пучков со сверхкритическим током образуется минимум потенциала — виртуальный катод, который при превышении током пучка некоторого критического значения начинает совершать колебания во времени и пространстве⁴. Характерными особенностями виркатеров являются простота

¹Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, *Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков*, В 2-х томах. М.: Физматлит, 2003;

J. Benford, J. A. Swegle, E. Schamiloglu, *High Power Microwaves*, CRC Press, Taylor and Francis, 2007;
S.E. Tsimring, *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007;

J.H. Booske, *Physics of Plasmas* 15(5) (2008) 055502.

²T. Klinger et al, *Physics of Plasmas* 8(5) (2001) 1961;

Н.М. Рыскин, Д.И. Трубецков, *Нелинейные волны*, М.: Физматлит, 2001.

³*Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот* / под редакцией А.А. Кураева, Д.И. Трубецкова, М.: Физматлит, 2009.

⁴А.Н. Диденко, Я.Е. Красик, С.Ф. Перелыгин, Г.П. Фоменко, *Письма в ЖТФ* 5 (6) (1979) 321;

А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир, *Радиотехника и электроника* 47 (6) (2002) 575.

конструкции, возможность работы без внешних магнитных полей, широкий диапазон перестройки частоты генерации, высокая мощность выходного СВЧ излучения. Вместе с тем, виркаторы характеризуются сложной пространственно-временной динамикой электронного пучка и, как следствие, высоким уровнем шумового пьедестала в спектре выходного излучения, поэтому представляет значительный интерес изучение различных методов управления и, в частности, подавления сложных режимов колебаний в подобных устройствах.

Исследования влияния внешней и внутренней обратной связи на характеристики виркаторных систем (виркатор с обратной связью получил название “виртод”⁵) положили начало изучению неавтономной динамики генераторов на виртуальном катоде. Проведенные исследования выявили высокую чувствительность выходных характеристик виртода к параметрам обратной связи. Кроме того, было показано, что обратная связь позволяет добиться стабильности частоты генерации, что является важной проблемой для приборов с виртуальным катодом. Несмотря на это, существует ряд открытых и малоизученных вопросов, касающихся динамики неавтономного пучка в виртоде. В частности, требуется детальное теоретическое исследование механизмов, приводящих к срыву генерации в двухззорном виртоде⁶, где длительность выходного импульса электромагнитного излучения существенно меньше длительности импульса ускоряющего напряжения.

Проведенные ранее экспериментальные и теоретические работы по изучению влияния внешнего сигнала на динамику виртуального катода показали возможность синхронизации колебаний выходного СВЧ излучения виркатора⁷. Ранее также была экспериментально показана возможность повышения мощности выходного излучения низковольтного виркатора под внешним воздействием⁸, при этом отсутствует фундаментальное понимание механизмов, приводящих к росту мощности выходного излучения неавтономного виркатора. Поэтому существует необходимость детального теоретического исследования данного эффекта, выявления условий его наблюдения и физических механизмов, приводящих к значительному повышению мощности электромагнитного излучения виркатора с предварительной модуляцией электронного пучка. Кроме того, в современной СВЧ электронике больших мощностей существует потребность в создании усилителей

⁵Н.Н. Гадецкий, И.И. Магда, С.И. Найстетер и др. Физика плазмы 19 (4) (1993) 530.

⁶A. S. Shlapakovski, T. Queller, Y. Bliokh, Y. E. Krasik, IEEE Trans. Plasma Sci. 40 (6) (2012) 1607.

⁷Woo W., Benford J., Fittinghoff D. et al, J.Appl.Phys. 65(2) (1989) 861;

Дубинов А. Е., Селемир В. Д., Царев А. В. Изв.вузов. Радиофизика. XLIII(8) (2000) 709;

Калинин Ю. А., Ремпен И. С., Храмов А. Е. Изв. РАН, сер. физич. 69(12) (2005) 1736.

⁸Ю.А. Калинин, А.Е. Храмов, Письма в ЖТФ 32(13) (2006) 88.

мощного микроволнового излучения. Понимание физических процессов, протекающих в интенсивном электронном пучке в режиме формирования виртуального катода под воздействием внешнего сигнала, может привести к созданию подобных устройств, где электронный поток с виртуальным катодом выступает в качестве активной среды для усиления внешнего сигнала.

На сегодняшний момент также вызывает значительный интерес задача анализа цепочек связанных мощных СВЧ генераторов в связи с развитием теории нелинейных антенн и изучением вопросов сложения мощностей от нескольких источников для получения сверхбольших уровней мощности выходного излучения⁹. Помимо этого важной задачей является анализ установления синхронизации между взаимодействующими виркаторами и использования этих колебательных систем в качестве активных модулей в схемах для скрытой передачи данных, основанных на установлении хаотической синхронизации между передающим и принимающим устройствами¹⁰. Низковольтные генераторы на виртуальном катоде в режиме широкополосной генерации могут быть рассмотрены как перспективные модули для проектирования приемо-передающих устройств в подобных системах передачи информации.

Обозначенные проблемы современной СВЧ электроники и радиофизики подтверждают актуальность настоящей диссертационной работы, посвященной анализу влияния внешнего воздействия на нелинейную динамику пучка с виртуальным катодом и управления характеристиками приборов с виртуальным катодом путем подачи внешнего сигнала.

Цель диссертационной работы состоит в изучении физических процессов формирования и нелинейной динамики виртуального катода в интенсивном электронном пучке в присутствии предварительной скоростной модуляции пучка внешним сигналом или сигналом обратной связи, а также в анализе характеристик выходного излучения неавтономного генератора на виртуальном катоде, цепочек генераторов на виртуальном катоде и возможности создания усилителя электромагнитных сигналов на основе пучка со сверхкритическим током.

Для достижения поставленной цели в рамках настоящей диссертационной работы были решены следующие научные задачи:

1. Разработаны аналитическая и численная одномерные модели неавтономной динамики электронного пучка в режиме образования виртуального катода в нерелятивистском виркаторе. Нестационарная самосогласованная

⁹Б.В. Алёхин, А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир и др., Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика 3 (1) (1995) 28

¹⁰А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, УФН. 179(12) (2009) 1281.

численная модель нерелятивистского электронного потока с виртуальным катодом и скоростной модуляцией пучка основана на методе “частиц в ячейке” в квазистатическом приближении.

2. В рамках построенных одномерных моделей детально изучены зависимости выходной мощности нерелятивистского генератора на виртуальном катоде от частоты и мощности внешнего воздействия. Получено хорошее согласие теоретических и численных результатов с экспериментальными данными.

3. Изучено влияние сигналов различной формы на процессы образования и колебания виртуального катода при рассмотрении однонаправленно связанных виркаторов. Изменение формы внешнего сигнала осуществлялось путем настройки ведущего генератора на различные колебательные режимы, которые варьировались от периодического и слабохаотического до режима развитого хаоса.

4. Исследован процесс установления синхронной динамики однонаправленно связанных виркаторных систем посредством анализа обобщенной синхронизации и синхронизации временных масштабов. Для диагностики обобщенной синхронизации применялись метод вспомогательной системы и расчет спектра показателей Ляпунова, которые показали высокую эффективность при анализе синхронного поведения связанных систем. При изучении вопроса об установлении синхронизации временных масштабов был использован аппарат непрерывного вейвлетного преобразования. Показана возможность использования режима обобщенной синхронизации низковольтного виркатора для реализации скрытой передачи информации.

5. В рамках лицензионного программного комплекса CST Particle Studio построена полностью электромагнитная трехмерная численная модель неавтономного нерелятивистского генератора на виртуальном катоде; проведена оптимизация геометрических параметров пушечной части, резонатора, а также электродинамических систем для ввода и вывода СВЧ сигнала для достижения наилучшего взаимодействия пучка с электромагнитными полями замедляющих систем.

6. В рамках построенных численных моделей пучка, а также сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными была показана высокая эффективность изучаемого подхода по увеличению выходной мощности виркаторных систем за счет предварительной скоростной модуляции частиц слабым внешним сигналом.

7. Предложена конструкция нового высокомоощного регенеративного усилителя, основанная на схеме релятивистского двухззорного генератора на

виртуальном катоде с внешней обратной связью (виртода)¹¹. Проведена математическая оптимизация параметров усилительной системы (как геометрических параметров резонаторной и волноведущей систем, так и параметров пучка) для достижения максимальной эффективности усиления внешнего сигнала средней мощности.

8. Проведено исследование усиления сигнала в предложенной релятивистской модели усилителя на виртуальном катоде. Особое внимание уделялось анализу выходных характеристик в зависимости от параметров входного сигнала и изучению вопроса о возможности управления выходными характеристиками за счет механической перестройки геометрии прибора.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. В рамках теоретического анализа и численного моделирования показано, что скоростная модуляция пучка на входе в рабочую камеру низковольтного виркатора внешним сигналом с частотой, близкой к частоте колебаний виртуального катода, позволяет максимально увеличить мощность выходного СВЧ излучения виркатора в $4 \div 7$ раз за счет улучшения группировки электронного потока в области образования виртуального катода. Данный эффект носит резонансный характер и наблюдается только на частотах, близких к частоте колебаний виртуального катода.

2. Увеличение выходной мощности неавтономного нерелятивистского генератора на виртуальном катоде с увеличением мощности внешнего сигнала носит пороговый характер и возникает после установления синхронизации временных масштабов между внешним воздействием и колебаниями виртуального катода — резкий рост мощности выходного излучения происходит в тот момент, когда энергия вейвлетного спектра, приходящейся на область синхронных временных масштабов, близка к полной энергии всего вейвлетного спектра выходных СВЧ колебаний. Существует оптимальная амплитуда внешнего сигнала, при которой выходная СВЧ мощность максимальна. Падение выходной мощности при воздействии мощного внешнего сигнала связано с ухудшением эффективности группировки пучка вследствие роста глубины модуляции пучка и последующей перегруппировки электронов в пространстве дрейфа.

3. Ограничение длительности импульса СВЧ излучения в релятивистском двухзазорном виртоде, кроме известных плазменных эффектов, определяется также изменением конфигурации электромагнитного поля в первом зазоре двухсекционного резонатора релятивистского виртода из-за на-

¹¹ С.А. Кицанов, А.И. Климов, С.Д. Коровин, И.К. Куркан, И.В. Пегель, С.Д. Полевин, ЖТФ 72(5) (2002) 82;

А. S. Shlapakovski, T. Queller, Y. Bliokh, Y. E. Krasik, IEEE Trans Plasma Sc. 40(6) (2012) 1607.

копления в нем избыточного пространственного заряда вследствие смещения виртуального катода в область первого зазора. Изменение формы и вида колебаний поля в первой секции резонатора нарушает механизм обратной связи в виртоде и препятствует формированию плотного электронного сгустка в области виртуального катода из-за ухудшения взаимодействия пучка с полем, что приводит к срыву СВЧ колебаний в виртоде.

4. Предложенная схема мощного релятивистского усилителя на виртуальном катоде, основанная на схеме двухсекционного релятивистского виртода, включающая в себя две отдельные секции, в первой из которых происходит предварительная скоростная модуляция пучка внешним усиливаемым сигналом, вводимым посредством коаксиального волновода, а во второй, выходной, секции формируются электронные сгустки, усиливающие входной сигнал, представляет собой регенеративный узкополосный усилитель с рабочим током, лежащим между первым и вторым критическими токами, с шириной полосы порядка 0.6%, максимальным коэффициентом усиления по мощности порядка 18 дБ и возможностью механической перестройки частоты за счет изменения геометрических параметров модулирующего резонатора.

Научная новизна. В диссертации впервые получены следующие новые научные результаты:

- Впервые проведено детальное исследование процессов формирования виртуального катода в интенсивном нерелятивистском электронном потоке в присутствии предварительной скоростной модуляции слабым внешним гармоническим сигналом в модуляторе, располагаемом на входе в рабочую камеру виркатора. Были получены зависимости мощности выходного СВЧ излучения от характеристик входного сигнала (мощность и частота). Показано, что при воздействии на пучок внешним гармоническим сигналом на частоте, близкой к частоте колебаний виртуального катода, при превышении мощности внешнего воздействия некоторого критического значения происходит существенное увеличение мощности выходного сигнала виркатора.

- Выявлены основные закономерности взаимодействия однонаправленно связанных генераторов на виртуальном катоде. Показано, что при близкой настройке управляющих параметров ведомого и ведущего генераторов, а также при оптимальной величине коэффициента связи возникает значительный рост выходной мощности исследуемой цепочки виркаторов. Такое поведение взаимодействующих колебательных систем объясняется с позиций возникновения синхронизации колебаний ведущей и ведомой колебательных систем. Также проведено систематическое исследование процессов перехода связанных систем с виртуальным катодом к режиму синхрониза-

ции в рамках диагностики обобщенной синхронизации и синхронизации временных масштабов.

- Впервые проведены моделирование физических процессов в нерелятивистском пучке со сверхкритическим током в неавтономном низковольтном виркаторе в рамках трехмерной полностью электромагнитной модели, а также математическая оптимизация геометрии прибора и электродинамических структур с помощью программного комплекса CST Particle Studio. При анализе данной нерелятивистской виркаторной системы также было продемонстрировано увеличение мощности выходного сигнала при подаче слабого внешнего гармонического воздействия, как было показано ранее в рамках одномерного моделирования пучка. Результаты, полученные при помощи трехмерного численного моделирования в CST Particle Studio, находятся в хорошем качественном и количественном согласии с результатами работ на экспериментальной установке, полученными в научной группе под руководством проф. Ю.А. Калинина.

- С помощью программного комплекса CST Particle Studio проведено численное исследование поведения пучка в двухсекционном релятивистском виртоде. Выявлен один из механизмов, ответственных за ограничение импульса выходного СВЧ излучения. Проведено сравнение результатов численного моделирования с известными экспериментальными данными, полученными научными группами под руководством проф. С.Д. Коровина (г. Томск, Россия) и проф. Я. Красика (г. Хайфа, Израиль). Получено хорошее согласие численных расчетов и экспериментальных данных.

- Впервые предложена модель мощного двухсекционного усилителя на виртуальном катоде. Разработанная и детально исследованная усилительная схема основана на схеме известного релятивистского двухзазорного виртода-генератора. Выявлены основные закономерности работы предложенного усилителя на основе релятивистского электронного пучка с виртуальным катодом, а также показаны зависимости выходных характеристик усилителя от параметров входного сигнала и перестройки геометрических параметров прибора.

Научная и практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что результаты, полученные в рамках проведенных исследований могут быть использованы для решения задач, связанных с созданием новых и оптимизацией уже существующих СВЧ приборов, содержащих электронные пучки со сверхкритическим током, для генерации и усиления импульсов мощного электромагнитного СВЧ излучения. Помимо этого полученные результаты, касающиеся синхронизации СВЧ приборов с виртуальным катодом, могут найти применение при создании элементной базы приемо-передающих устройств на основе низковольтных виркаторов

в сфере телекоммуникации и разработки фазированных антенных решеток в радиолокационных схемах. Проведенный анализ физических процессов в электронных пучках, приводящих к улучшению группировки частиц в области образования виртуального катода за счет воздействия слабого внешнего сигнала, позволяет дать рекомендации специалистам, занимающимся проектированием и разработкой устройств с виртуальным катодом, включая системы ускорения ионных потоков, по достижению оптимальных параметров подобных приборов.

В рамках настоящей диссертационной работы изучены физические механизмы, приводящие к росту выходной мощности неавтономных систем с виртуальным катодом. Анализ оптимальных условий формирования виртуального катода в пучке позволит существенно увеличить выходную мощность рассматриваемых приборов, а также продвинуться в решении актуальной для виркаторных систем задачи повышения КПД. Кроме прикладного значения полученные результаты имеют также фундаментальную значимость, поскольку внешнее воздействие можно рассматривать как способ управления сложной нелинейной динамикой активной автоколебательной среды, который влияет на процессы образования и взаимодействия структур.

Важной как с практической, так и с фундаментальной точек зрения является задача об изучении взаимодействия связанных генераторов на виртуальном катоде, поскольку интенсивные электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями, являются распределенными автоколебательными системами пучково-плазменной природы. Проводимые исследования позволяют расширить понимание процессов вынужденной и взаимной синхронизации связанных активных сред, что является важным с точки зрения современной радиофизики для создания теории синхронизации распределенных автоколебательных систем.

Исследование процессов и характеристик генерации мощного электромагнитного излучения, а также механизмов ограничения длительности СВЧ импульсов в схеме двухззорного виртода могут быть полезны при проектировании и оптимизации характеристик такого перспективного класса виркаторных систем как виртоды, которые характеризуются высокой мощностью, близкой к одночастотной генерацией, низким уровнем шумов, возможностью работы без магнитных полей, относительно высоким КПД. Рассмотрение релятивистского электронного потока с током, лежащим между первым и вторым критическими токами, как активной среды для усиления внешнего сигнала открывает перспективы для создания высокоомощных усилителей на основе приборов с виртуальным катодом, что является актуальной задачей современной электроники больших мощно-

стей.

При выполнении диссертации были получены охранные документы на результаты интеллектуальной деятельности: патент РФ на изобретение и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, позволяющие проводить оптимизацию характеристик источников электромагнитного излучения СВЧ диапазона на основе виркаторов. Результаты диссертации были использованы при выполнении ряда НИР и научных грантов.

Обоснование и достоверность результатов, полученных в ходе проведения исследований в рамках настоящей диссертационной работы, подтверждается их воспроизводимостью, совпадением с данными известных экспериментальных работ, корректным выбором схем для численного моделирования и их параметров.

Личный вклад. Основные результаты диссертации получены лично автором. В большинстве совместных работ автором выполнены все численные и аналитические расчеты. Постановка задач, разработка методов их решения, объяснение и интерпретация результатов были осуществлены совместно с научным руководителем и другими соавторами научных работ, опубликованных соискателем.

Апробация работы. Настоящая диссертационная работа выполнена на кафедре электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении НИР, выполняемых в рамках Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы; проектов Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 09-02-00255, 10-02-20002, 12-02-90022, 12-02-00345, 12-02-33071, 13-02-01209, 13-02-90406, 14-02-31204); Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проекты НШ-3407.2010.2 и НШ-1430.2012.2); грантов президента РФ для поддержки молодых кандидатов и докторов наук (гранты МД-345.2012.2, МК-672.2012.2, МД-345.2013.2, МК-818.2013.2, МК-1373.2014.2); проектов Министерства образования и науки РФ (гранты 14.В37.21.1289, 14.В37.21.0764, 14.В37.21.0751, 14.В37.21.0059, №3.59.2014/К).

Представленные результаты неоднократно докладывались на различных семинарах и конференциях Всероссийского и Международного уровня, среди которых: XII, XIII и XIV Всероссийская школа-семинар “Волновые явления в неоднородных средах” (Звенигород, 2010; 2012; 2014), IX и X Международная школа “Хаотические автоколебания и образование структур” (Саратов, 2010; 2013), XIII и XIV Всероссийская школа-семинар “Физика и применение микроволн” (Звенигород, 2011; 2013), 21, 22, 23 и

24 Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”(Севастополь, 2011; 2012; 2013; 2014), XV Международная Зимней школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике (Саратов, 2012), 9th CST European User Conference 2014 (Germany, Berlin, 2014). Результаты диссертационной работы дважды докладывались и обсуждались на научном семинаре кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов.

Публикации. Результаты работы опубликованы в реферируемых научных журналах (10 статей), рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, в трудах конференций (12 статей и тезисов докладов). Получено 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 158 страниц текста и 62 иллюстрации. Библиографический список содержит 141 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность тематики проведенных исследований, их новизна и практическая значимость, сформулирована цель исследований и приведены основные результаты, выводы и положения диссертационной работы, выносимые на защиту, дано краткое изложение содержания работы.

В первой главе диссертационной работы детально описывается одномерная численная модель нерелятивистского электронного потока в низковольтном генераторе на виртуальном катоде, основанная на методе крупных частиц, с возможностью ввода внешнего сигнала при помощи предварительной скоростной модуляции пучка на входе в пространство дрейфа. Кроме этого для анализа процессов в неавтономном электронном пучке с виртуальным катодом предложена стационарная аналитическая модель. Аналитическое и численное исследования показали возможность увеличения мощности колебаний выходного электромагнитного излучения генератора на виртуальном катоде за счет предмодуляции пучка внешним сигналом на частоте колебаний виртуального катода. В ходе численного моделирования и анализа стационарной теоретической модели были выявлены основные условия и физические механизмы, приводящие к существенному росту выходной мощности. В частности, показано, что увеличение мощности выходного излучения неавтономного виркатора происходит вследствие улучшения группировки пучка в области образования виртуального катода за счет модуляции пучка внешним сигналом.

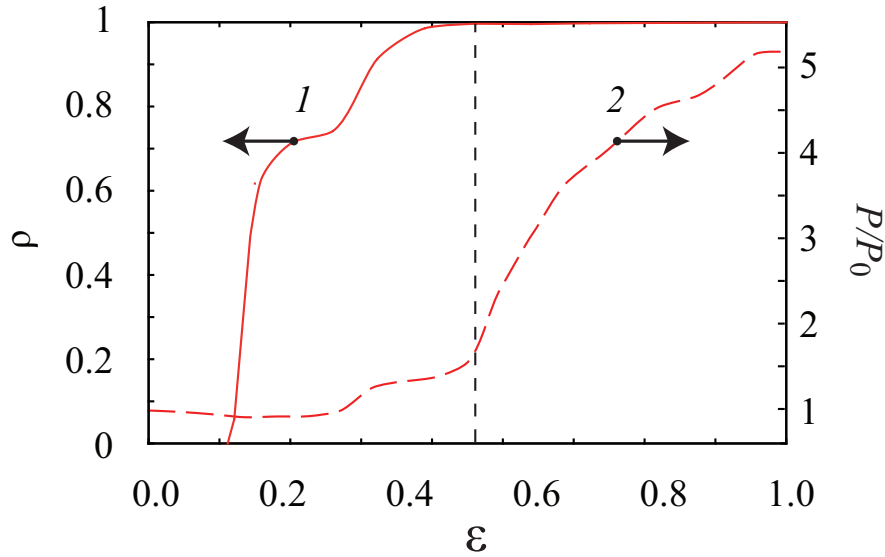


Рис. 1: Зависимость меры синхронизации ρ (кривая 1) и нормированной выходной мощности цепочки связанных генераторов на виртуальном катоде (кривая 2) от параметра связи между ними ε . Мера синхронизации ρ определяется отношением энергии вейвлетного спектра, приходящейся на область синхронных временных масштабов, к полной энергии всего вейвлетного спектра выходных СВЧ колебаний. Выходная мощность нормирована на мощность автономной генерации P_0 . Быстрый рост мощности выходного сигнала начинается при достижении меры синхронизации $\rho \approx 1$

Помимо этого в ходе одномерного численного моделирования была изучена динамика однонаправленно связанных генераторов на виртуальном катоде. С помощью варьирования управляющих параметров ведущего генератора для смены динамических режимов колебаний выходного излучения было исследовано влияние внешних сигналов различных форм на динамику и выходные характеристики системы связанных виркаторов. Было показано, что в цепочке генераторов на виртуальном катоде, связанных однонаправленно, также наблюдается увеличение выходной мощности, условием для этого является близкая настройка управляющих параметров взаимодействующих генераторов. Также была исследована нелинейная динамика связанных виркаторов с позиций диагностики синхронизации. Были диагностированы такие режимы синхронизации, как синхронизация временных масштабов и обобщенная синхронизация. В рамках исследования синхронных режимов была показана связь роста мощности неавтономного генератора и синхронизации колебаний виртуального катода и внешнего воздействия. На рисунке 1 представлены зависимость меры синхронизации временных масштабов (кривая 1), которая определяется отношением энергии вейвлетного преобразования, приходящейся на область синхронных временных масштабов, к полной энергии вейвлетного спектра и поведение входной мощности цепочки (кривая 2) от параметра связи между генераторами. Видно, что резкий рост мощности наблюдается при синхро-

низации большей части спектра взаимодействующих генераторов, т.е. когда мера синхронизации близка к единице.

Вторая глава диссертационной работы посвящена изучению модели экспериментального макета низковольтного виркатора, исследуемого в научной группе Саратовского государственного университета под руководством проф., д.т.н. Ю.А. Калинина, в рамках трехмерного полностью электромагнитного численного моделирования с помощью лицензионного программного комплекса CST Particle Studio.

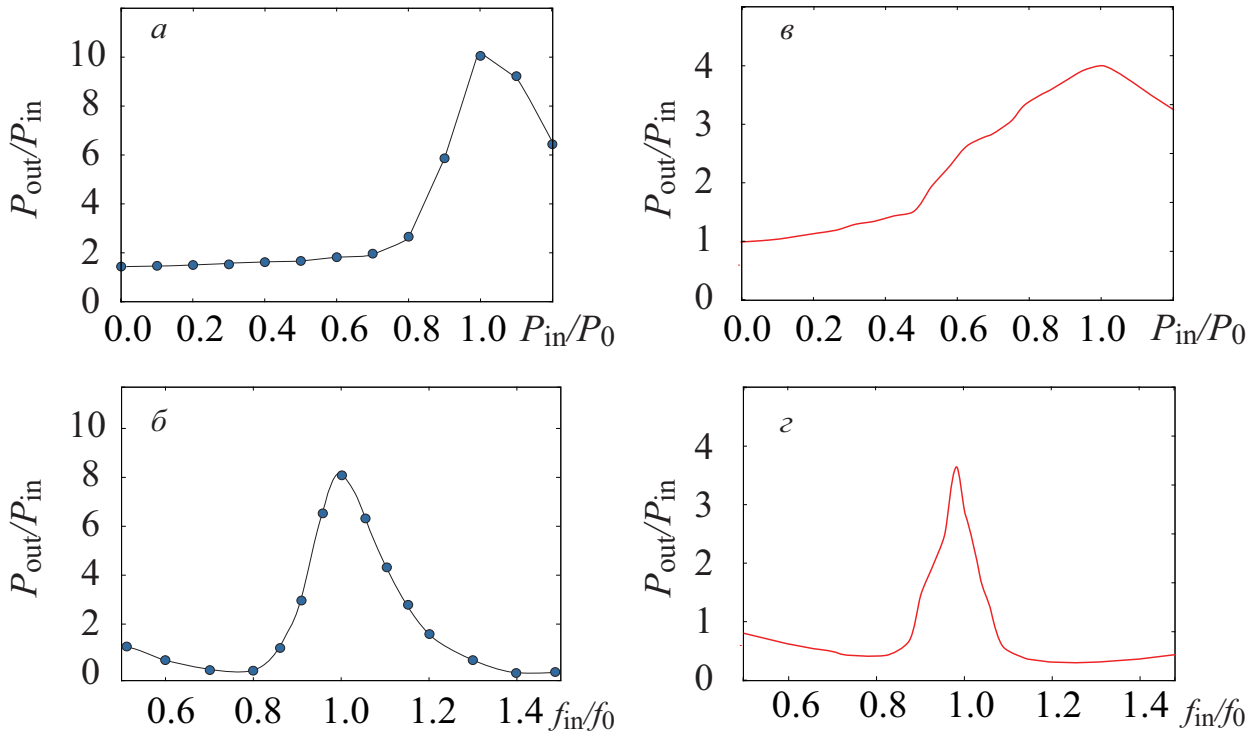


Рис. 2: Зависимости мощности неавтономного виркатора от мощности внешнего сигнала (а,в) и частоты внешнего сигнала (б,г). Приведенные зависимости получены в ходе исследования на экспериментальной установке с дополнительным торможением (а,б) и численного моделирования с помощью программного комплекса CST Particle Studio (в,г). Мощность входного и выходного сигнала нормирована на мощность автономной генерации, частота входного сигнала нормирована на частоту генерации виркатора в автономном режиме.

В данной главе описан процесс создания трехмерной электромагнитной модели автономного низковольтного виркатора без дополнительного тормозящего поля. Рассмотренная схема низковольтного виркатора состоит из диодной электронной пушки и пространства дрейфа, образованного цилиндрическим резонатором. Вывод электромагнитного излучения колебаний виртуального катода в данной системе производится с помощью отрезка широкополосной спиральной системы. На дальнем конце пространства дрейфа расположена коллекторная система для вывода отработанных заряженных частиц. Была проведена оптимизация геометрических па-

раметров электронной пушки, выходной электродинамической структуры, пространства дрейфа и параметров пучка для достижения максимальной выходной мощности СВЧ сигнала. Оптимизированная модель низковольтного виркатора была модифицирована для работы в неавтономном режиме — между электронной пушкой и пространством дрейфа встроена секция предварительной модуляции пучка с отрезком спиральной структуры и элементом ввода внешнего сигнала. В данной главе также приводятся результаты численного исследования влияния внешнего одночастотного сигнала на выходные характеристики низковольтной виркаторной системы без дополнительного торможения потока. Проведено сопоставление результатов теоретического анализа с результатами экспериментального исследования влияния внешнего одночастотного сигнала на характеристики генерации низковольтного виркатора с дополнительным торможением пучка для лучшего формирования электронного сгустка в пространстве дрейфа, проведенного в научной группе профессора Ю.А. Калинина. На рис. 2 приведены зависимости выходной мощности неавтономного виркатора от параметров внешнего гармонического сигнала (мощности и частоты), полученные экспериментально (а,б) и численно (в,г). Скоростная модуляция пучка на входе в рабочую камеру низковольтного виркатора с частотой, близкой к частоте колебаний виртуального катода, позволяет увеличить мощность выходного СВЧ излучения виркатора за счет улучшения группировки электронного потока в области образования виртуального катода (рис. 2а,в). Существует оптимальная амплитуда внешнего сигнала, при которой выходная СВЧ мощность максимальна. Падение выходной мощности при воздействии более мощного внешнего сигнала связано с ухудшением эффективности группировки пучка вследствие роста глубины модуляции пучка и последующей перегруппировки электронов в пространстве дрейфа. Обнаруженный эффект носит резонансный характер и наблюдается только на частотах, близких к частоте колебаний виртуального катода (рис. 2б,г). Следует отметить, что результаты численного исследования хорошо согласуются с данными эксперимента.

В третьей главе диссертационной работы в рамках трехмерного электромагнитного моделирования исследуется вопрос о динамике релятивистского пучка с виртуальным катодом в схеме двухззорного релятивистского виртода. Конструкция рассматриваемого двухззорного виртода представляет собой электронную пушку, образованную катодом и анодной сеткой, и двухсекционный резонатор, в котором первая (модулирующая) секция и вторая секция, где образуется виртуальный катод и производится вывод электромагнитного излучения, соединены друг с другом через окно связи, при помощи которого в системе осуществляется электромагнитная внешняя об-

ратная связь. Особое внимание в данной главе уделено вопросу создания мощного усилителя на основе электронного потока со сверхкритическим током.

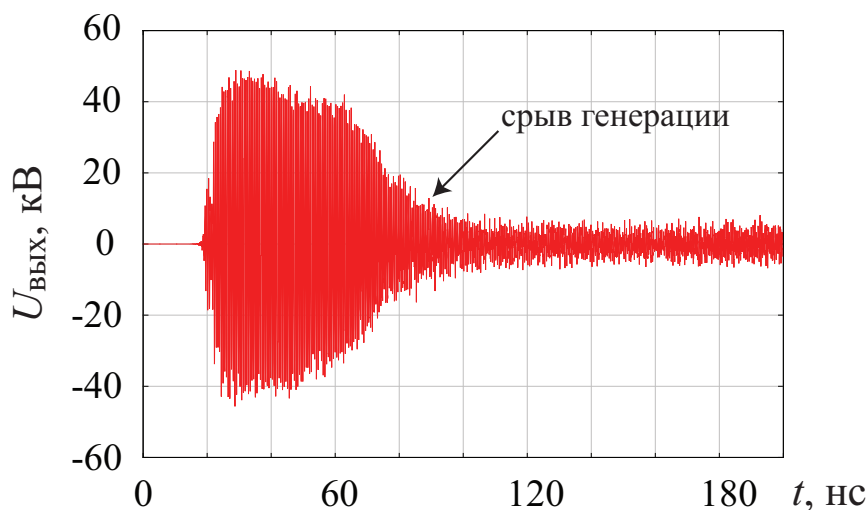


Рис. 3: Характерная форма импульса выходного сигнала релятивистского виртода, полученная в ходе трехмерного полностью электромагнитного численного моделирования с помощью программного комплекса CST Particle Studio. Величина тока пучка составляет $I_0 = 16$ кА, ускоряющее напряжение $V_0 = 1.1$ МВ. Длительность импульса ускоряющего напряжения существенно превышает длительность импульса СВЧ излучения в системе

Описаны принципы работы двухзазорного виртатора и особенности численного моделирования данной системы с помощью лицензионного программного комплекса CST Particle Studio. Приводится детальное описание основных физических механизмов и особенностей конструкции двухзазорного виртода, приводящие к генерации стабильного СВЧ излучения высокого уровня мощности, а также подробно излагаются вопросы, касающиеся создания трехмерной модели в CST Particle Studio и сравнения результатов численного моделирования с известными экспериментальными работами исследователей из научных групп из Института сильноточной электроники СО РАН (г. Томск) и Израильского института технологий "Технион" (г. Хайфа, Израиль).

В ходе проведения численного моделирования был обнаружен механизм срыва генерации (рисунок 3), который, помимо известных плазменных эффектов, объясняется перестройкой моды колебаний электромагнитного поля в модулирующем зазоре и нарушением обратной связи, что является одним из основных механизмов формирования виртуального катода и генерации в релятивистском виртоде.

Подробно описано преобразование конструкции релятивистского двухзазорного генератора на виртуальном катоде для создания усилителя на базе этого прибора. Данное преобразование заключается в следующем: удаля-

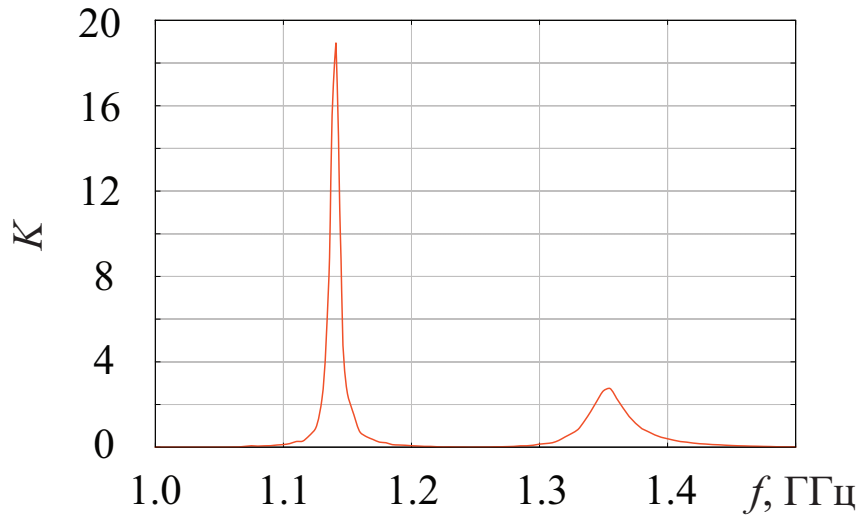


Рис. 4: Зависимость коэффициента усиления по мощности от частоты усиливаемого сигнала. Мощность усиливаемого сигнала $P_{in} = 0.25$ МВт

ется окно обратной связи, соединяющее секции двухззорного резонатора, а в стенку модулирующего резонатора встраивается коаксиальный волновод для ввода внешнего сигнала, при этом ток релятивистского электронного потока выбирается немного меньше второго критического, но больше первого критического. При разработке конструкции усилителя на виртуальном катоде была проведена математическая оптимизация геометрии прибора и параметров пучка с целью минимизации потерь энергии электромагнитного поля через входной волновод и достижения максимального коэффициента усиления входного сигнала. На рисунке 4 приведена зависимость коэффициента усиления предложенного усилителя на виртуальном катоде от частоты внешнего сигнала. Представленная зависимость имеет два характерных пика, определяемых модами модулирующего резонатора, и показывает, что рассматриваемый усилитель является узкополосным, при этом ширина полосы частот усиливаемого сигнала составляет $\sim 0.6\%$. Важно заметить, что наиболее эффективно усиливается внешний сигнал среднего уровня мощности (порядка $0.25 \div 1$ МВт) с максимальным коэффициентом усиления порядка 18 дБ. При подаче сигнала более высокой мощности (более 5 МВт) коэффициент усиления выходит на насыщение и составляет порядка 12 дБ. Также были проведены исследования, показывающие возможность перестройки частоты за счет изменения геометрии входного модулирующего резонатора.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты и выводы

1. В рамках одномерной модели электронного пучка с виртуальным катодом под воздействием внешнего гармонического сигнала, основанной на

методе частиц в ячейке, а также стационарной аналитической модели была показана возможность существенного увеличения мощности колебаний виртуального катода, связанная с улучшением группировки электронного потока в области виртуального потока за счет предварительной скоростной модуляции. Аналогичный эффект роста мощности выходного излучения был получен при рассмотрении цепочки однонаправленно связанных генераторов на виртуальном катоде при близкой настройке управляющих параметров ведущего и ведомого генераторов.

2. В ходе исследований цепочки связанных генераторов на виртуальном катоде было обнаружено, что в рассматриваемой цепочке связанных автоколебательных систем возможно установление обобщенной синхронизации и синхронизации временных масштабов. Также с позиций установления режима синхронизации временных масштабов дана трактовка увеличению мощности выходных колебаний системы: резкий рост мощности связан с синхронизацией большей части компонент спектра колебаний взаимодействующих генераторов.

3. С помощью программного комплекса CST Particle Studio была разработана трехмерная модель неавтономного нерелятивистского генератора на виртуальном катоде и проведена оптимизация систем ввода и вывода сигнала для достижения наиболее эффективного взаимодействия пучка с замедляющими спиральными электродинамическими структурами. В рамках анализа оптимизированной модели неавтономного виркатора был также продемонстрирован значительный рост выходной мощности, показанный в рамках одномерного моделирования. Результаты численного исследования качественно и количественно согласуются с данными, полученными на экспериментальной установке низковольтного виркатора.

4. Проведено трехмерное полностью электромагнитное моделирование процессов в релятивистском пучке в двухззорном виртоде. При рассмотрении численной модели, не описывающей процессы ионизации, был обнаружен эффект срыва генерации, который наблюдался в известных экспериментальных работах. Численное моделирование показало, что такой эффект связан с переключением моды колебаний в одной из секций двухззорного виртода и заметным снижением эффективности взаимодействия пучка и электромагнитного поля.

5. Разработана и оптимизирована новая модель усилителя СВЧ сигналов высокого уровня мощности на виртуальном катоде, основанная на модели двухззорного виртода. Показано, что данный прибор является эффективным узкополосным усилителем СВЧ излучения с возможностью механической перестройки частоты за счет механической настройки геометрии входного резонатора.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. Исследование характеристик генерации в цепочке однонаправленно связанных низковольтных виркаторов // Известия РАН. Серия Физическая. 2011. Т. 75. №12. С. 1697–1700.
- [2] Фролов Н.С. Динамика электронного потока с виртуальным катодом в низковольтном виркаторе под внешним гармоническим воздействием // Известия Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20. №3. С. 152–159.
- [3] Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А., Стародубов А.В. Теоретический и экспериментальный анализ мощности СВЧ излучения генератора на виртуальном катоде под внешним гармоническим воздействием // Известия РАН. Серия Физическая. 2012. Т. 76. №12. С. 1485–1488.
- [4] Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А., Сельский А.О., Фролов Н.С., Макаров В.В., Условия формирования виртуального катода в релятивистском электронном потоке // Прикладная радиоэлектроника. 2012. Т. 11. №4. С. 489–497.
- [5] Moskalenko O.I., Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Synchronization in the network of chaotic microwave oscillators // European Physics Journal Special Topics. 2013. V. 222. P. 2571–2582.
- [6] Фролов Н.С., Максименко В.А., Ильенко К., Короновский А.А., Храмов А.Е. Применение спектра показателей Ляпунова для анализа динамики пучково-плазменных систем, моделируемых с помощью метода крупных частиц // Известия РАН. Серия Физическая. 2014. Т. 78. №2. С. 237–240.
- [7] Короновский А.А., Москаленко О.И., Павлов А.С., Фролов Н.С., Храмов А.Е. Обобщенная синхронизация в случае воздействия хаотического сигнала на периодическую систему // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. №5. С. 1–8.
- [8] Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Kalinin Y., Kurkin S.A., Hramov A.E. The effect of an external signal on output microwave power of a low-voltage vircator // Physics Letters A. 2014. V. 378. P. 2423–2428.
- [9] Фролов Н.С., Короновский А.А., Руннова А.Е., Храмов А.Е. Обобщенная синхронизация связанных генераторов на виртуальном катоде // Известия РАН. Серия Физическая. 2014. Т. 78. №12. С. 1608–1611.
- [10] Фролов Н.С., Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А. Изучение механизмов генерации в системах с виртуальным катодом в рамках трехмерного электромагнитного моделирования электронного потока // Известия РАН. Серия Физическая. 2014. Т. 78. №12. С. 1604–1607.
- [11] Короновский А.А., Фролов Н.С., Храмов А.Е. Исследование хаотической генерации в цепочке связанных низковольтных виркаторов // Материалы IX Международной школы «Хаотические автоколебания и образование структур». Саратов. 4-9 октября 2010. С. 126–127. – Саратов: СГУ. 2010.
- [12] Короновский А.А., Фролов Н.С., Храмов А.Е. Исследование характеристик генерации в цепочке однонаправленно связанных низковольтных виркаторов // Сборник трудов XIII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн». Москва. 23-28 мая 2011. С. 36. – Москва: МГУ. 2011
- [13] Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. Мощность выходного СВЧ излучения цепочки двух однонаправленно связанных низковольтных виркаторов // Материалы Международной Крымской конференции «СВЧ–техника и телекоммуни-

- кационные технологии». Севастополь. 12-16 сентября 2011. С. 846. – Севастополь: Вебер. 2011.
- [14] Фролов Н.С. Влияние предварительной скоростной модуляции электронного потока на выходную мощность СВЧ генерации виркатора // Материалы XV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. Саратов. 6-12 февраля 2012. С. 25. – Саратов: СГУ. 2012
- [15] Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А., Стародубов А.В. Теоретический и экспериментальный анализ динамики генератора на виртуальном катоде под внешним гармоническим воздействием // Сборник трудов XIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах». Москва. 21-26 мая 2012. С. 34. – Москва: МГУ. 2012.
- [16] Фролов Н.С., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Стародубов А.В., Храмов А.Е. Увеличение мощности генерации виркатора путём воздействия на него внешнего слабого гармонического сигнала // Материалы 22-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 10-14 сентября 2012. С. 763. – Севастополь: Вебер. 2012.
- [17] Москаленко О.И., Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. Обобщенная синхронизация в системе двух однонаправлено связанных низковольтных виркаторов // Материалы 22-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 10-14 сентября 2012. С. 769. – Севастополь: Вебер. 2012.
- [18] Фролов Н.С., В.А. Максименко, Короновский А.А., Храмов А.Е. Метод расчета спектра показателей Ляпунова для пучково-плазменных систем, описываемых методом крупных частиц // Сборник трудов XIV Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн». Москва. 20-25 мая 2013. С. 46. – Москва: МГУ, 2013.
- [19] Фролов Н.С., Короновский А.А., Максименко В.А., Ильенко К., Опанасенко А.Н., Яценко Т.Ю., Храмов А.Е. Расчет спектра пространственных показателей Ляпунова для пучково-плазменных систем, описываемых в рамках метода крупных частиц // Материалы 23-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 8-13 сентября 2013. С. 769. – Севастополь: Вебер. 2013.
- [20] Фролов Н.С., Короновский А.А., Максименко В.А., Храмов А.Е. Анализ сложной динамики распределенных систем электроники СВЧ, моделируемых в рамках РИС-метода // Материалы X Международной школы «Хаотические автоколебания и образование структур». 7-12 октября 2013. С. 126. – Саратов: СГУ. 2013.
- [21] Москаленко О.И., Павлов А.С., Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. Скрытая передача информации на основе обобщенной синхронизации хаотического сигнала на периодические генераторы // Материалы 24-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии». 7-13 сентября 2014. С. 217. – Севастополь: Вебер. 2014.
- [22] Фролов Н.С., Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А. Анализ сложной турбулентной динамики электронного потока в низковольтном виркаторе в рамках трехмерного электромагнитного моделирования // Материалы 24-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии». 7-13 сентября 2014. С. 835. – Севастополь: Вебер. 2014.

- [23] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613659. Программа моделирования частичной обобщенной синхронизации пространственно-временного хаоса в пространственно-распределенной системе. Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. ФГБОУ ВПО СГУ имени Н.Г. Чернышевского. Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 04.06.2010.
- [24] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610191. Программа для моделирования нестационарных процессов, протекающих в цепочках и сетях генераторов на виртуальном катоде. Короновский А.А., Храмов А.Е., Фролов Н.С. ФГБОУ ВПО СГУ имени Н.Г. Чернышевского. Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 09.01.2013.
- [25] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612473. Программа для ЭВМ для диагностики хаотической синхронизации. Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. ФГБОУ ВПО СГТУ имени Гагарина Ю.А. Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 01.03.2013.
- [26] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617845. Программа для расчета спектра показателей Ляпунова для пространственно-распределенных пучково-плазменных систем, моделируемых в рамках РС-метода. Короновский А.А., Храмов А.Е., Фролов Н.С. ФГБОУ ВПО СГТУ имени Гагарина Ю.А. Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 05.08.2014.
- [27] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611060. Расчет спектра показаний Ляпунова для связанных пространственно-распределенных пучково-плазменных систем, моделируемых в рамках метода крупных частиц. Фролов Н.С., Храмов А.Е., Короновский А.А. ФГБОУ ВПО СГУ имени Н.Г. Чернышевского. Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 23.01.2015

ФРОЛОВ Никита Сергеевич

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ, СИНХРОНИЗАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ
СИГНАЛОВ В НИЗКОВОЛЬТНОМ ВИРКАТОРЕ И ВИРТОДЕ

Автореферат

Подписано к печати 24.04.15.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага типографская офсет. Гарнитура “Times”
Усл. печ. л. 1,39 (1,5). Тираж 120 экземпляров. Заказ 100–Т

Отпечатано с готового оригинал–макета
Типография “Новый Проект”.
410012, г. Саратов, ул. Московская, 160.