

*На правах рукописи*

КУРКИН Семён Андреевич

НЕЛИНЕЙНЫЕ И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В  
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ “ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОТОК С  
ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ”

01.04.03 – Радиофизика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2011

Работа выполнена на кафедре электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов и в Научно–исследовательском институте естественных наук (отделение физики нелинейных систем) Саратовского государственного университета.

Научный руководитель: д.ф.–м.н., профессор,  
**Храмов Александр Евгеньевич**

Официальные оппоненты: д.ф.–м.н., профессор,  
**Дмитриев Борис Савельевич**  
д.ф.–м.н., профессор,  
**Привезенцев Алексей Павлович**

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

Защита состоится “29” июня 2011 г. в 11 часов 00 минут в Большой физической аудитории III корпуса СГУ на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 по специальности 01.04.03 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 “23” мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



В.М. Аникин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследуемой проблемы.** Исследование нелинейных и нестационарных процессов, происходящих в распределенных волновых системах, содержащих потоки заряженных частиц, является одной из актуальных задач современной радиофизики и нелинейной теории колебаний и волн ввиду своей очевидной связи с такими фундаментальными проблемами как возникновение пространственно–временных хаотических колебаний и образование диссипативных структур в пространственно–распределенных активных средах<sup>1</sup>. Одновременно, данная проблема тесно связана с такой актуальной задачей радиофизики и СВЧ электроники, как создание фундаментальных основ теории пучковых генераторов и усилителей большого уровня мощности, для которых характерны сложные нелинейные режимы, включая пространственно–временной хаос<sup>2</sup>.

Одним из важных и актуальных направлений исследований в связи с этим является изучение колебательных процессов в интенсивных потоках заряженных частиц, возникающих под влиянием собственных высокочастотных полей (полей пространственного заряда) электронного потока и приводящих в результате развития неустойчивости Пирса к образованию минимума потенциала (виртуального катода – ВК) в пространстве дрейфа<sup>3</sup>. При этом отражение части электронов от ВК обратно к плоскости инжекции приводит к появлению в системе нестационарной нелинейной динамики, включая хаотические режимы колебаний<sup>4</sup>. Подобные режимы с нестационарным ВК используются для создания различных устройств с ВК, используемых в качестве источников мощного СВЧ излучения (генераторы на ВК или виркаторы) и систем ускорения ионов<sup>5</sup>. Уже первые эксперименты и численные расчеты показали, что пучковые системы с ВК характеризуются сложными многочастотными режимами колебаний и сверхбольшим уровнем мощности выходного СВЧ излучения<sup>6</sup>. Однако, несмот-

---

<sup>1</sup> М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков, *Введение в теорию колебаний и волн*. М.–Ижевск: РХД, 2000; Н.М. Рыскин, Д.И. Трубецков, *Нелинейные волны*. М.: Физматлит, 2001; М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе, *Электродинамика плотных электронных пучков в плазме*. М.: Наука, 1990.

<sup>2</sup> В.Д. Селемир, Б.В. Алёхин, В.Е. Ватрунин и др., *Физика плазмы* 20 (7, 8) (1994) 689; Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, *Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2-х томах*. М.: Физматлит, 2003, 2004.

<sup>3</sup> V.L. Granatstein, I. Alexeeff, *High Power Microwave Sources*. Artech House Microwave Library, 1987.

<sup>4</sup> А.П. Привезенцев, Г.П. Фоменко, *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2 (5) (1994) 56.

<sup>5</sup> А.Н. Диденко, Я.Е. Красик, С.Ф. Перелыгин и др., *Письма в ЖТФ* 5 (6) (1979) 321;

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

А.Е. Дубинов, И.Ю. Корнилова, В.Д. Селемир, *УФН* 172 (2002) 1225

J. Benford, J.A. Swegle, E. Schamiloglu, *High Power Microwaves*. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.

<sup>6</sup> Н.Е. Brandt, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 13 (6) (1985) 513;

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

ря на сравнительно большое число теоретических и экспериментальных работ по виркаторам и их модификациям, в том числе работ по исследованию ультрарелятивистских систем с ВК<sup>7</sup>, говорить о полном понимании сложных нелинейных процессов, включая возникновение шумоподобных хаотических колебаний, типичных для систем с ВК, пока преждевременно. Многие важные вопросы и задачи остаются неисследованными.

Так, практически не изучено влияние величины и конфигурации внешнего магнитного поля на формирование и динамику ВК в электронном потоке со сверхкритическим током. Решение данной задачи позволит продвинуться в изучении и оптимизации процессов в электронно-волновых системах с ВК. Здесь можно выделить целый ряд неисследованных проблем, в частности остаются неизученными влияние внешнего магнитного поля на условия формирования ВК, влияние однородного и неоднородного внешнего фокусирующего магнитного поля, релятивистских эффектов и собственных магнитных полей релятивистского пучка на динамику ВК, выбор оптимальной фокусирующей магнитной системы для виркатора и т.п. Поэтому необходимо детальное систематическое решение данных задач в рамках нелинейной нестационарной теории, учитывающей двух- и даже трехмерные эффекты в динамике пространственного заряда и электромагнитных полей в пространстве взаимодействия виркатора.

Сказанное выше позволяет считать тему диссертации, посвящённой исследованию влияния величины и конфигурации внешнего магнитного поля на условия формирования и нелинейную динамику ВК в различных виркаторных системах, актуальной.

**Цель диссертационной работы** состоит в исследовании влияния величины и конфигурации внешних магнитных полей на условия и механизмы формирования виртуального катода в различных виркаторных системах, нелинейную динамику электронного потока с виртуальным катодом, а также в выявлении физических процессов, приводящих к возникновению сложного хаотического поведения виртуального катода в виркаторах.

Для достижения этой цели в диссертационной работе решены следующие задачи.

1. Разработаны аналитические и численные модели; на их основе созданы программы для численного моделирования нелинейных нестационарных процессов в интенсивных электронных потоках с виртуальным катодом (ВК), как для слаборелятивистских, так и для релятивистских и ультрарелятивистских систем, с учетом различных значимых факторов

---

<sup>7</sup> В.П. Игнатенко, Радиотехника и электроника 7 (1962) 1175;

J.W. Poukey, J.R. Freeman, Phys. Fluids 17 (1974) 1917;

V.L. Granatstein, I. Alexeeff, *High Power Microwave Sources*. Artech House Microwave Library, 1987.

(разброс электронов по скоростям, экранирование источника электронов от внешнего магнитного поля и др.).

2. Исследовано влияние величины внешнего однородного магнитного поля на механизмы и условия формирования ВК (критические токи) в сплошном и трубчатом электронных потоках при различной степени экранирования источника электронов от внешнего магнитного поля.

3. Изучено влияние релятивистских эффектов в системе на механизмы и условия формирования ВК в электронных потоках во внешнем однородном фокусирующем магнитном поле.

4. Исследованы процессы образования структур и особенности нелинейной динамики релятивистского электронного потока с ВК (в том числе, его сложного хаотического поведения), находящегося во внешнем однородном магнитном поле, и влияние на эти процессы тока пучка и внешнего магнитного поля.

5. Изучено влияние степени экранирования источника электронов от внешнего однородного магнитного поля на нелинейную динамику ВК.

6. Исследовано влияние внешнего неоднородного магнитного поля на характеристики генерации (частота, спектральный состав, мощность) низковольтной системы с ВК; изучены физические причины данного влияния.

7. Проведена физическая оптимизация магнитной периодической фокусирующей системы низковольтного виркатора и процессов в нем для достижения оптимальных спектральных характеристик выходного широкополосного СВЧ излучения и максимальной выходной мощности излучения.

8. Исследовано влияние начального разброса электронов по скоростям и углам на динамику ВК и на характеристики генерации виркатора.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. С ростом величины индукции внешнего однородного магнитного поля наблюдается конкуренция поперечной (движение к боковой стенке или к оси симметрии пространства дрейфа) и продольной (движение вдоль оси симметрии системы) динамики пространственного заряда в области виртуального катода в нерелятивистских и слаборелятивистских электронных потоках; следствием этого является то, что величина критического тока монотонно уменьшается, а затем незначительно увеличивается, асимптотически приближаясь к постоянному значению, с ростом величины индукции внешнего однородного магнитного поля.

2. Значительное влияние на условия и механизмы формирования виртуального катода в ультрарелятивистских электронных потоках оказывают собственные магнитные поля пучка, приводящие к характерному виду зависимостей критического тока ультрарелятивистского электронного потока от величины индукции внешнего однородного магнитного поля, который

заключается в том, что при малых значениях внешнего магнитного поля наблюдается область увеличения критического тока пучка с ростом индукции внешнего магнитного поля, сменяющаяся его монотонным уменьшением и насыщением на постоянном уровне.

3. Изменение величин индукции внешнего однородного магнитного поля и тока пучка приводит к перестройке режима динамики электронного потока с виртуальным катодом, в частности, к хаотизации колебаний виртуального катода в системе, механизм которой обусловлен образованием и взаимодействием в пучке электронных структур: виртуального катода и вторичных по отношению к нему электронных сгустков. Переход от хаотических режимов колебаний виртуального катода к периодическим связан с разрушением вторичных электронных структур в потоке.

4. Изменение положения в пространстве одного кольцевого магнита или увеличение числа магнитных колец при использовании магнитной периодической фокусирующей системы в низковольтном виркаторе приводит к возникновению дополнительных электронных структур в потоке, взаимодействие между которыми, в свою очередь, хаотизирует колебания пространственного заряда пучка и, как следствие, приводит к расширению полосы частот, генерируемых низковольтным виркатором, до 1–1.5 октавы.

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

- Впервые проведено систематическое исследование механизмов и условий формирования ВК в слаборелятивистских сплошном и трубчатом электронных потоках, находящихся во внешнем однородном магнитном поле, при различной степени экранирования источника электронов от внешнего магнитного поля в рамках двумерной самосогласованной релятивистской численной модели, основанной на решении системы уравнений Пуассона и уравнений движения заряженных частиц. Получены характерные зависимости критических токов слаборелятивистских электронных пучков от величины внешнего магнитного поля при различных параметрах электронного потока и системы в целом.

Показано, что характерный вид данных зависимостей обусловлен конкуренцией продольного и поперечного типов динамики пространственного заряда в области ВК при изменении величины внешнего однородного магнитного поля.

- Выявлено характерное поведение зависимостей критических токов ультрарелятивистских электронных потоков от величины внешнего однородного магнитного поля. Показано, что данное поведение зависимостей обусловлено влиянием собственных магнитных полей релятивистского по-

тока на механизмы формирования ВК в системе. В результате действия собственных магнитных полей потока и обусловленной данными полями силы Лоренца, у частиц потока появляются азимутальные компоненты скорости, т.е. пучок начинает вращаться вокруг оси симметрии системы как единое целое. За счет действия центробежной силы на вращающиеся электроны в пространстве дрейфа в пучке образуется вихревая электронная структура. Обнаруженная неустойчивость, приводящая к потере аксиальной симметрии потока, способствует формированию ВК и, как следствие, уменьшению величины критического тока пучка, т.к. обусловленная неустойчивостью вращение потока и последующее образование вихревой структуры создают лучшие условия для разброса и отражения частиц из области вихревой структуры обратно к плоскости инжекции. Показано, что данный эффект наиболее ярко проявляется при небольших величинах внешнего магнитного поля и высоких энергиях инжектируемого пучка.

- Впервые исследовано влияние величины внешнего однородного магнитного поля на нелинейную динамику ВК в цилиндрических трубчатых электронных потоках в случае неэкранированного от внешнего магнитного поля источника электронов, а также изучена эволюция сложных пространственно-временных колебаний пространственного заряда в системах с ВК (виркаторах) при изменении внешнего однородного магнитного поля. При этом обнаружено, что существует возможность перестройки режимов динамики ВК от регулярных до хаотических широкополосных колебаний. Показано, что хаотизация колебаний ВК связана с возникновением вторичных электронных структур в потоке по отношению к основной электронной структуре — ВК. Впервые изучено влияние экранировки источника электронов от внешнего однородного магнитного поля на нелинейную динамику ВК.

- Впервые исследовано влияние внешнего неоднородного магнитного поля (в частности, фокусирующего магнитного поля, создаваемого магнитной периодической фокусирующей системой) на характеристики генерации низковольтной системы с ВК. При этом обнаружено, что в такой системе существует возможность перестройки режимов динамики ВК от регулярных до хаотических широкополосных колебаний. Впервые изучены механизмы хаотизации колебаний ВК в низковольтной виркаторной системе с внешним неоднородным магнитным полем, приводящие к усложнению динамики виркаторной системы и к появлению многочастотного спектра излучения генератора. Показано, что хаотизация колебаний ВК в данном случае обусловлена формированием вторичных электронных структур в потоке под влиянием внешнего неоднородного магнитного поля и возникающей в таком поле магнитной ловушки.

- Впервые проведена физическая оптимизация параметров магнитной периодической фокусирующей системы низковольтного виркатора для достижения оптимальных спектральных характеристик выходного широкополосного СВЧ излучения и максимальной выходной мощности излучения. Показано, что условия, накладываемые на оптимизацию генератора с электронной обратной связью, связанные с максимальной выходной мощностью и максимальной шириной полосы выходного излучения, являются несовместимыми. Максимальная выходная мощность в системе с одним кольцевым магнитом реализуется при сравнительно узкой полосе генерируемых частот. Увеличение магнитного поля или увеличение числа периодов магнитной периодической фокусирующей системы, при которых спектр выходного излучения расширяется и становится менее изрезанным, сопровождается резким уменьшением интегральной мощности СВЧ излучения, которая уменьшается в 2–3 раза по сравнению со случаем периодической генерации.

**Научная и практическая значимость** диссертационной работы состоит в том, что полученные в ней результаты могут найти применение при решении задач, связанных с разработкой новых и оптимизацией существующих пучково–плазменных устройств для генерации сверхширокополосных хаотических СВЧ колебаний, мощных импульсов СВЧ электромагнитного излучения и ускорения ионов на основе интенсивных пучков заряженных частиц с ВК. Анализ физических процессов, приводящих к усложнению динамики в пучково–плазменных системах с ВК, находящихся во внешних магнитных полях, позволяет дать обоснованные рекомендации специалистам, проектирующим генераторы на ВК, по достижению необходимых выходных характеристик данных устройств.

В частности, одной из важных решаемых в диссертационной работе в данном направлении задач является поиск оптимальной конфигурации фокусирующего магнитного поля для генератора на ВК, которая позволит достигнуть требуемых спектральных характеристик выходного СВЧ излучения и максимальной мощности выходного излучения. Данная задача имеет несомненный прикладной интерес, однако, существует и значительная фундаментальная ценность понимания влияния внешнего неоднородного магнитного поля на формирование и динамику ВК в интенсивном пучке заряженных частиц. Внешнее магнитное поле можно рассматривать как некоторый управляющий фактор, которым можно влиять на поведение нелинейной активной среды, в частности, управляя процессами образования и взаимодействия электронных структур (электронных сгустков) в пространстве взаимодействия.

Исследования, проведенные для ультрарелятивистских виркаторных си-



стем, помогут, в свою очередь, корректно учитывать релятивистские эффекты при разработке мощных генераторов на ВК во внешнем однородном магнитном поле.

Вместе с тем, решение поставленных в диссертации задач имеет большое фундаментальное значение, так как модели распределенных систем, содержащих электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями, являются одними из базовых для современной радиофизики, физики плазмы, а также нелинейной теории колебаний и волн. Поэтому полученные в диссертации результаты позволяют продвинуться в понимании таких проблем как возникновение динамического хаоса и его связи с формированием и взаимодействием пространственно–временных структур в распределенных нелинейных системах электронно–плазменной природы, демонстрирующих пространственно развитый хаос. Таким образом, полученные результаты важны для создания общей теории колебаний и волн в распределенных автоколебательных системах.

Указанная проблема тесно связана с такими фундаментальными проблемами, как возникновение турбулентности и образование диссипативных структур в пространственно–распределенных плазменных средах. Данные задачи возникают при анализе поведения многих пучково-плазменных систем, в частности, анализе процессов при взаимодействии потоков заряженных частиц с плазмой в приборах и устройствах ускорения ионов и электроники больших мощностей, при изучении нелинейных явлений в газовых разрядах, процессов при развитии различных неустойчивостей в плазменных диодах и т.д.

При выполнении диссертационной работы предложен ряд решений, которые защищены патентами Российской Федерации, позволяющих улучшить характеристики источников шумоподобных сигналов СВЧ диапазона виркаторного типа. Результаты диссертации были использованы при выполнении ряда НИР и научных грантов.

**Обоснование и достоверность** полученных в работе численных результатов подтверждается их воспроизводимостью, совпадением с данными аналитических исследований, отсутствием противоречий с известными экспериментальными результатами, обоснованным выбором численных схем 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.** Материалы диссертационной работы использовались при выполнении НИР, выполняемых в рамках АВЦП “Развитие научного потенциала высшей школы” на 2009–2011 годы; ФЦП “Научные и научно–педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы; проектов РФФИ; Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проекты НШ–355.2008.2 и НШ–3407.2010.2) и др.

Представленные результаты неоднократно докладывались на различных семинарах и конференциях российского и международного уровня, среди которых: VIII и IX Международные школы–семинары “Хаотические автоколебания и образование структур” (Саратов, 2007; 2010), XIV и XV Всероссийские научные школы “Нелинейные волны’2008” и “Нелинейные волны’2010” (Н.Новгород, 2008; 2010), 18, 19 и 20 Международные Крымские конференции “СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, 2008; 2009; 2010), Международная конференция “European Electromagnetics” EUROEM 2008 (Switzerland, Lausanne, 2008), школа “Нелинейные дни для молодых–2008” (Саратов, 2008), 51 научная конференция МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук” (Долгопрудный, 2008), XIV зимняя школа–семинар по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 2009), II сессия Всероссийской научной школы–практикума “Технологии высокопроизводительных вычислений и компьютерного моделирования” (Санкт–Петербург, 2009), XII Всероссийская школа–семинар “Волны–2009” (Москва, 2009), 17th and 18th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES) (Switzerland, Rapperswill, 2009; Germany, Dresden, 2010), 3rd Chaotic Modeling and Simulation International Conference (Greece, Crete, Chania, 2010).

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Научно–техническом совете Института плазменной электроники и новых методов ускорения Национального научного центра “Харьковский физико–технический институт” и на научном семинаре кафедры электроники, колебаний и волн Саратовского университета.

**Публикации.** Результаты работы опубликованы в двух главах в монографиях, одной коллективной монографии, в реферируемых научных журналах (15 статей), рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, в трудах конференций (20 статей и тезисов докладов). Получен патент РФ на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Она содержит 239 страниц текста,

61 иллюстрацию и 4 таблицы. Библиографический список содержит 146 наименований.

## 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, содержатся сведения о достоверности и апробации результатов, дано краткое изложение содержания работы.

**В первой главе** диссертации описаны теоретические и численные модели для исследования нелинейных нестационарных процессов в интенсивных электронных потоках с ВК, как для слаборелятивистских, так для релятивистских систем с учетом различных факторов (разброс электронов по скоростям, экранирование источника электронов от внешнего магнитного поля, использование магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС), учет двух- и трехмерных эффектов динамики потока и др.). Обсуждаются важные аспекты и особенности численной реализации данных моделей.

В разделе 1.2 рассматриваются общие подходы и замечания, касающиеся построения моделей пучковой системы с ВК. В разделе 1.3 обсуждаются аналитическая и численная модели слаборелятивистской системы с ВК, основанные на решении самосогласованной системы уравнений движения заряженных частиц и уравнения Пуассона в двух пространственных измерениях с учетом аксиальной симметрии исследуемой системы. В разделе 1.3 также описывается процесс задания начального разброса электронов по скоростям и углам влета и метод моделирования вывода мощности (отрезка широкополосной электродинамической системы) на основе метода эквивалентных схем.

Раздел 1.4 посвящен обсуждению исследуемой модели релятивистского электронного потока с ВК, основанной на самосогласованной системе релятивистских уравнений движения заряженных частиц и уравнений Максвелла в предположении трехмерного движения электронов. Для численного решения предложенной модели был разработан 3-мерный полностью электромагнитный программный код.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена исследованию влияния величины внешнего однородного магнитного поля, а также других параметров системы (степени экранирования электронной пушки от внешнего магнитного поля, радиуса электронного пучка и др.) на механизмы и

условия формирования ВК в слаборелятивистской и релятивистской виркаторных системах. Проведено подробное исследование поведения зависимостей критических токов электронных потоков от величины внешнего магнитного поля и других параметров системы.

Показано, что внешнее однородное магнитное поле оказывает сильное влияние на формирование и динамику ВК в сплошных и трубчатых электронных потоках. Анализ конфигурационных портретов и пространственно-временных диаграмм пучка демонстрирует существование двух качественно различных типов динамики ВК в зависимости от величины внешнего однородного магнитного поля. Так, при малых магнитных полях, меньших некоторого значения  $B_{min}$ , в системе преобладает поперечная динамика пространственного заряда по направлению к боковой стенке пространства дрейфа, а при больших  $B > B_{min}$  — продольная динамика и пульсации пучка (последние наблюдаются только в случае экранирования источника электронов от магнитного поля).

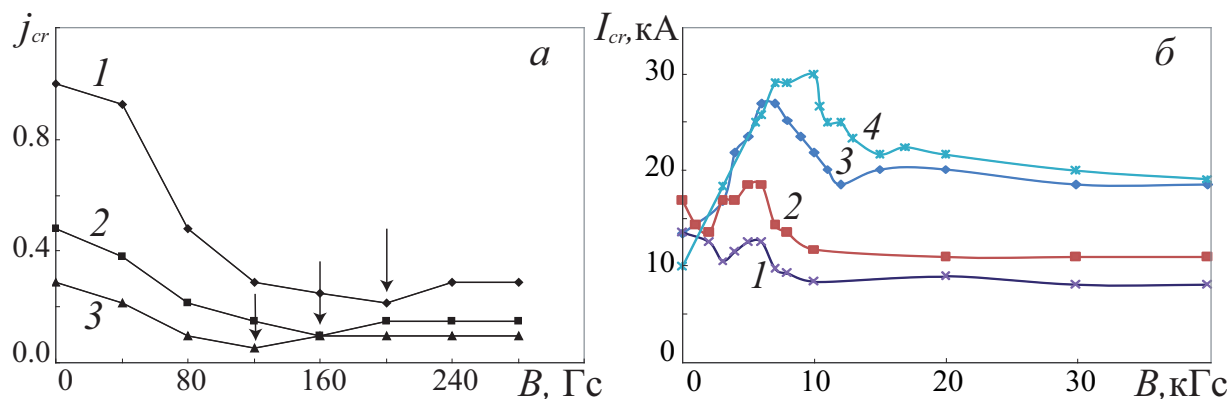


Рис. 1: (а): зависимости нормированной величины критической плотности тока сплошного электронного пучка от величины  $B$  внешнего магнитного поля при  $\sigma = R_b/R = 0.3$ , где  $R_b$  – внешний радиус пучка,  $R$  – радиус пространства дрейфа (кривая 1),  $\sigma = 0.5$  (кривая 2) и  $\sigma = 0.8$  (кривая 3). Величины оптимального магнитного поля  $B_{min}$ , при котором критическая плотность тока минимальна, показаны на рисунке стрелками. Нормировка осуществляется на величину критической плотности тока пучка при  $B = 0$  Гс и  $\sigma = 0.3$  и (б): зависимости критического тока релятивистского трубчатого электронного пучка от величины индукции внешнего однородного магнитного поля при  $\sigma = 0.5$  для следующих значений энергии инжектируемого электронного потока  $W_e$ : 480 кэВ ( $\beta_0 = v_0/c \sim 0.9$ , кривая 1), 600 кэВ ( $\beta_0 \sim 0.93$ , кривая 2), 850 кэВ ( $\beta_0 \sim 0.976$ , кривая 3) и 1 МэВ ( $\beta_0 \sim 0.982$ , кривая 4)

Анализ зависимостей критической плотности тока сплошного и трубчатого электронных пучков от величины внешнего однородного магнитного поля  $I_{cr}(B)$  показал, что конкуренция двух различных типов динамики пространственного заряда ВК приводит к характерному поведению данных зависимостей, которые приведены на рис. 1а для сплошного пучка с экранированным источником электронов. Было обнаружено, что суще-

ствуется оптимальная величина магнитного поля  $B_{min}$ , при которой критическая плотность тока пучка минимальна. При магнитных полях, меньших оптимальной величины  $B_{min}$ , наблюдается монотонное уменьшение критической плотности тока пучка с увеличением индукции  $B$ , при больших в случае наличия экранирования источника электронов от внешнего магнитного поля — монотонный рост и асимптотическое насыщение, а в случае отсутствия экранирования — сразу асимптотическое насыщение величины критического тока на постоянном уровне. Причем величина тока, соответствующая данному уровню, хорошо согласуется с величиной критического тока, определенной аналитически в работах А.А. Рухадзе и М.В. Кузелева для случая полностью замагниченного электронного потока (одномерного движения частиц пучка)<sup>8</sup>. Показано, что введение в систему экранирования источника электронов от внешнего магнитного поля изменяет характер поведения зависимостей критического тока пучков от внешнего однородного магнитного поля при  $B > B_{min}$ . Это связано с изменением физических процессов, происходящих в электронном потоке, при введении экранирования в систему в случае больших внешних магнитных полей, а именно с развитием в потоке сильных нерегулярных пульсаций.

Найдены аналитические выражения для величины  $B_{min}$  оптимального внешнего однородного магнитного поля, при котором критический ток электронного потока достигает минимального значения соответственно для случаев экранированного и неэкранированного источника электронов:

$$B_{min} = \frac{1}{R_b} \sqrt{\frac{\sqrt{2}I}{\pi \varepsilon_0 \eta^{3/2} \sqrt{V_0}}}, \quad B'_{min} = R_{VC} \sqrt{\frac{\sqrt{2}I}{\pi \varepsilon_0 \eta^{3/2} \sqrt{V_0} (R_{VC}^4 - R_b^4)}}, \quad (1)$$

где  $R_b$  — внешний радиус пучка,  $R_{VC}$  — радиус пучка в области ВК,  $I$  — ток электронного потока,  $V_0$  — ускоряющее напряжение.

Обнаружено, что на условия формирования и динамику ВК сильное влияние оказывает геометрия пучка. Для любой величины внешнего магнитного поля существует оптимальный нормированный радиус инжекции трубчатого пучка  $\sigma_{opt}$ , при котором критическая плотность тока минимальна.

Изучено влияние релятивистских эффектов на механизмы и условия формирования ВК в электронных потоках во внешнем однородном фокусирующем магнитном поле.

Анализ критических токов ультрарелятивистских электронных потоков от величины внешнего однородного магнитного поля (см. рис. 1б) показал, что зависимости  $I_{cr}(B)$  имеют характерную особенность, отличающую их

<sup>8</sup> А.А. Рухадзе, Л.С. Богданкевич, С.Е. Росинский, В.Г. Рухлин, *Физика сильноточных релятивистских пучков*. М.: Атомиздат, 1980

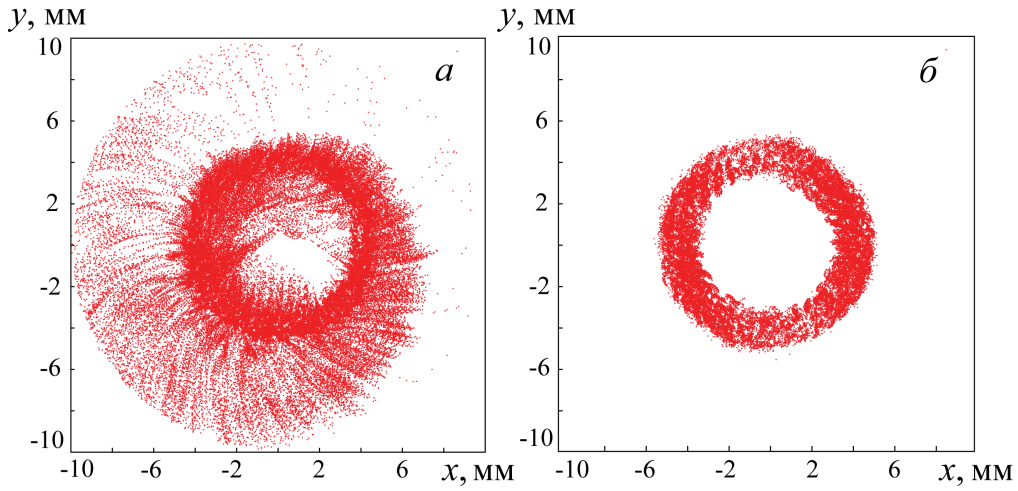


Рис. 2: Проекция мгновенных положений крупных частиц электронного ультрарелятивистского потока в пространстве  $(x, y, z)$  на плоскость  $(x, y)$  в сечении плоскостью  $z = 6$  мм при следующих параметрах системы:  $B = 3$  кГс,  $I = 7.5$  кА (а) и  $B = 30$  кГс,  $I = 10$  кА (б)

от соответствующих зависимостей для слаборелятивистских систем, которые характеризуются монотонным уменьшением критического тока, сменяющимся дальнейшим насыщением его величины, с увеличением внешнего магнитного поля  $B$ . Выявленная особенность заключается в том, что при определенных значениях индукции внешнего магнитного поля наблюдается область увеличения критического тока пучка с ростом внешнего магнитного поля. Увеличение критического тока в зависимости от энергии инжектируемого электронного потока имеет место либо сразу при  $B \geq 0$ , либо при бóльшей величине внешнего магнитного поля вслед за типичным для всех рассмотренных систем монотонным уменьшением критического тока пучка с ростом  $B$ , связанным с наличием фокусировки пучка и соответствующего повышения плотности заряда в пространстве дрейфа. При дальнейшем увеличении внешнего магнитного поля  $B$  при любых значениях энергии инжектируемого электронного потока вновь наблюдается монотонное уменьшение критического тока пучка с ростом индукции  $B$ , которое при  $B \sim B_{min}$  сменяется его насыщением на постоянном относительно невысоком уровне. Показано, что описанное поведение кривых приводит к появлению дополнительных локальных максимумов на зависимостях критического тока пучка от величины внешнего однородного магнитного поля.

Исследование физических процессов показало, что подобное характерное поведение зависимостей критического тока релятивистского электронного пучка (РЭП) от внешнего магнитного поля определяется физическим эффектом, обусловленным неустойчивостью аксиально-симметричного состояния потока под влиянием собственных магнитных полей РЭП. Было показано, что в результате действия собственных магнитных полей пото-

ка у заряженных частиц появляются азимутальные компоненты скорости, т.е. РЭП начинает вращаться вокруг оси симметрии системы как единое целое. За счет данного вращения и действия центробежной силы на вращающиеся электроны в РЭП образуется вихревая электронная структура. На рис. 2 изображены проекции мгновенных положений крупных частиц РЭП при параметрах системы, соответствующих случаю формирования вихревой структуры в потоке (малая величина внешнего магнитного поля; рис. 2а), а также случаю отсутствия вихревой структуры (большое внешнее магнитное поле, подавляющее неустойчивость; рис. 2б). Данная неустойчивость способствует формированию ВК и, как следствие, уменьшению величины критического тока пучка, т.к. обусловленное неустойчивостью вращение потока и последующее образование вихревой структуры создают лучшие условия для разброса и отражения частиц из области вихревой структуры обратно к плоскости инжекции. Показано, что данный эффект наиболее ярко проявляется при небольших величинах внешнего магнитного поля и высоких энергиях инжектируемого пучка, когда эффекты, связанные с собственными магнитными полями РЭП проявляются наиболее сильно.

**Третья глава** диссертации посвящена изложению результатов исследования влияния величины внешнего однородного магнитного поля и тока электронного потока на нелинейную динамику ВК в релятивистских вихреватых системах, а также на режим генерации приборов на ВК. Особое внимание в третьей главе уделяется исследованию физических процессов, определяющих особенности сложного нелинейного поведения ВК и переключений режимов его динамики при различных величинах внешнего магнитного поля и величинах тока пучка.

Были построены карты режимов колебаний ВК на различных плоскостях управляющих параметров, которые показали, что ВК в трубчатом электронном потоке во внешнем однородном магнитном поле демонстрирует различные режимы колебаний, включая как регулярные, так и хаотические. На основе анализа пространственно-временных диаграмм пучка выявлен общий механизм хаотизации колебаний ВК в системе, связанный с образованием в электронном потоке электронных структур (ВК и вторичных по отношению к нему электронных уплотнений в пролетном потоке), взаимодействие между которыми через общее поле пространственного заряда определяет возникновение дополнительной внутренней обратной связи в системе. Формирование вторичных электронных сгустков и взаимодействие их с ВК, которые определяют возникновение хаотических режимов колебаний ВК, наблюдается в системе в случае отсутствия экранирования либо при относительно невысоких величинах тока пучка ( $\alpha \sim \alpha_{cr} \div 1.5\alpha_{cr}$ ,

где  $\alpha_{cr}$  — критическое значение безразмерного тока электронного потока), либо при бóльших токах пучка ( $\alpha > 3\alpha_{cr}$ ) и сильных внешних магнитных полях ( $B > B_{min}$ ). Переход от хаотических режимов колебаний ВК к периодическим связан с разрушением механизма формирования вторичных электронных структур (сгустков) за областью ВК. Таким образом, было показано, что изменение величины внешнего однородного магнитного поля позволяет эффективно управлять режимами генерации прибора на ВК.

Показано, что переход к хаотическому режиму (образование вторичных сгустков) в случае значительных токов пучка ( $\alpha > 3\alpha_{cr}$ ) и сильных внешних магнитных полей ( $B > B_{min}$ ) обусловлен появлением в системе долгоживущих частиц, совершающих циклотронное вращение благодаря наличию большого по величине продольного магнитного поля в пространстве дрейфа. Усиление последнего эффекта возможно обеспечить введением экранирования источника электронного пучка от внешнего магнитного поля, так как это приводит к появлению у частиц потока начального вращательного момента при его инжекции в пространство дрейфа с однородным магнитным полем. Действительно, обнаружено, что частичное или полное экранирование источника электронов от внешнего магнитного поля (например, размещение источника электронов в полях рассеяния соленоида), приводит к усложнению динамики колебаний ВК в системе. Как показал анализ пространственно–временных диаграмм пучка, в случае экранированного от магнитного поля источника электронов в системе наблюдаются долгоживущие частицы, характеризующиеся сложной пространственно–временной динамикой, и формирующие вторичные электронные структуры (сгустки) в системе. Вторичные сгустки оказывают воздействие на динамику основной электронной структуры (ВК) за счет общего поля пространственного заряда, возмущая и хаотизируя колебания ВК.

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена изложению результатов исследования влияния параметров внешнего неоднородного магнитного поля на характеристики генерации (частота, спектральный состав, мощность) низковольтной системы с ВК и изучения возможностей и направлений оптимизации магнитной периодической фокусирующей системы низковольтного виркатора для достижения оптимальных спектральных характеристик выходного широкополосного СВЧ излучения и максимальной выходной мощности излучения.

Рассмотрение физических процессов в СВЧ генераторе с электронной обратной связью (низковольтном виркаторе<sup>9</sup>) показало, что увеличение

---

<sup>9</sup> Е.Н. Егоров, Ю.А. Калинин, Ю.И. Лёвин, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, Известия РАН. Серия физическая 69 (12) (2005) 1724;

Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов и др., Физика плазмы 31 (11) (2005) 1009.



величины магнитного поля одного магнита или увеличение числа периодов при использовании магнитной периодической фокусирующей системы, усложняющее распределение магнитного поля в области формирования ВК, приводит к возникновению дополнительных электронных структур в потоке, взаимодействие между которыми, в свою очередь, хаотизирует колебания пространственного заряда пучка и, как следствие, приводит к расширению полосы частот, генерируемых низковольтным виркатором.

Достигнутое понимание физических процессов в системе с электронной обратной связью, приводящих к хаотизации колебаний пространственного заряда во внешнем неоднородном магнитном поле и, как следствие, к расширению полосы генерируемых частот, позволило провести оптимизацию структуры внешнего неоднородного фокусирующего магнитного поля с точки зрения достижения максимальной ширины и полосы генерируемых частот. Анализ количественных данных (карт режимов динамики ВК в системе, зависимостей изрезанности спектра выходного излучения) подтвердил результаты качественного рассмотрения и оптимизации генераторов с электронной обратной связью на основе интенсивных пучков заряженных частиц с ВК и показал, что путем увеличения параметра внешнего магнитного поля  $B$  или числа магнитных колец  $N$  возможно эффективно управлять режимом генерации низковольтного виркатора: уменьшить изрезанность спектра выходного излучения в  $3 \div 4$  раза и получить на выходе генератора широкополосный слабоизрезанный хаотический СВЧ сигнал. Оптимальными значениями параметров  $B$  и  $N$  с точки зрения получения широкополосного хаотического СВЧ сигнала с наилучшими характеристиками являются те, при которых наступает насыщение величины изрезанности выходного спектра на минимальном уровне (в исследованном случае:  $B \sim 1.6$  кГс,  $N = 1$  или  $B = 0.4$  кГс,  $N \sim 3$ ). Показано, что выбор данных параметров магнитной системы позволяет получить необходимое качество спектров выходного широкополосного излучения без излишнего усложнения, увеличения габаритов и веса внешней магнитной системы низковольтного генератора с ВК.

Построение и анализ зависимостей выходной мощности низковольтного виркатора от различных параметров генератора (в том числе, от параметра внешнего неоднородного магнитного поля, числа и положения магнитных колец в магнитной периодической фокусирующей системе, тока пучка) показали (рис. 3), что условия, накладываемые на оптимизацию генератора с электронной обратной связью, связанные с максимальной выходной мощностью и максимальной шириной полосы выходного излучения, являются несовместимыми. Максимальная выходная мощность в системе с одним кольцевым магнитом реализуется при сравнительно узкой полосе генери-

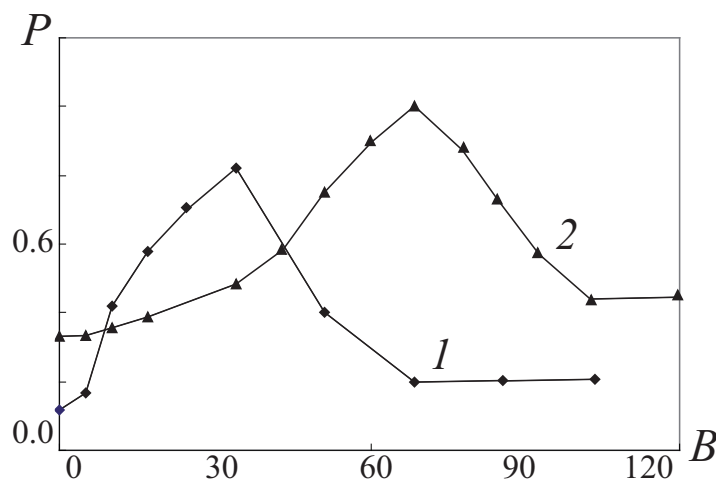


Рис. 3: Зависимости нормированной выходной мощности  $P$  генерации от безразмерного параметра  $B$  магнитного поля для генератора с магнитной системой с одним кольцевым магнитом для параметров тока пучка  $\alpha = 10$  (кривая 1) и  $\alpha = 20$  (кривая 2)

руемых частот, когда низковольтный виркатор демонстрирует близкие к периодическим режимы колебаний.

Увеличение магнитного поля или увеличение числа периодов МПФС, при которых спектр генерации расширяется и становится менее изрезанным, сопровождается резким уменьшением интегральной мощности излучения, которая уменьшается в 2–3 раза по сравнению со случаем периодической генерации (при  $B = 0$ ). В режиме широкополосной генерации выходная мощность излучения слабо зависит от параметров магнитной фокусирующей системы генератора с электронной обратной связью, однако, все же имеется возможность несколько увеличить её величину (на 10–15%) путем более тщательного подбора параметров генератора.

Получено, что в режимах развитой хаотической генерации электронный КПД взаимодействия, определяемый как отношение выходной мощности к мощности электронного потока, в оптимальном режиме не превышает 1.7%, в то время как переход к режимам узкополосной, а тем более регулярной генерации приводит к значительному росту КПД, который в оптимальном по мощности режиме достигает почти 10%.

В рамках исследования низковольтного виркатора с МПФС было изучено влияние начального разброса электронов по скоростям и углам на характеристики генерации ВК. Обнаружено, что увеличение степени начального разброса электронов приводит к подавлению генерации в приборе и, следовательно, к монотонному уменьшению выходной мощности. Исследованы физические процессы, ответственные за подобное поведение системы, которые связаны с разрушением главной электронной структуры (ВК) с увеличением разброса электронов по скоростям.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы дис-

сертационной работы.

В **Приложении** к диссертационной работе дано описание разработанного электромагнитного кода для численного моделирования динамики релятивистского электронного потока с ВК и оптимизации физических процессов в генераторах на ВК (генераторах с электронной обратной связью), а также расчета их выходных характеристик. Также кратко излагаются результаты тестирования разработанных численных моделей, реализующих их модулей программного кода и результаты сравнения получаемых численных данных с теоретическими расчетами.

### **Основные результаты и выводы**

1. Получены характерные зависимости критических токов электронных пучков различной геометрии от величины внешнего однородного магнитного поля при различных параметрах электронного потока и системы в целом.

2. Обнаружен физический эффект, отвечающий за характерное поведение зависимостей критического тока ультрарелятивистского трубчатого электронного пучка от величины внешнего однородного магнитного поля, обусловленный влиянием собственных магнитных полей релятивистского потока на механизмы формирования ВК в системе. Показано, что данный эффект приводит к образованию вращающейся вихревой электронной структуры в потоке, которая способствует формированию ВК и, как следствие, уменьшению величины критического тока пучка.

3. Обнаружено, что существует возможность перестройки режимов динамики ВК в потоках от регулярных до хаотических широкополосных колебаний путем изменения величин внешнего однородного магнитного поля и тока пучка. Показано, что хаотизация колебаний ВК связана с возникновением вторичных электронных структур в потоке по отношению к основной электронной структуре — ВК. Изучено влияние экранировки источника электронов от внешнего однородного магнитного поля на нелинейную динамику ВК.

4. Показано, что изменение параметров внешнего неоднородного магнитного поля приводит к сильной перестройке режимов динамики ВК в низковольтной виркаторной системе, в том числе к установлению режима хаотической генерации прибора.

5. Проведена оптимизация конфигурации внешнего неоднородного магнитного поля в низковольтном виркаторе для достижения оптимальных спектральных характеристик выходного широкополосного СВЧ излучения и максимальной выходной мощности излучения.

## Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] Ю. А. Калинин, С. А. Куркин, Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов. СВЧ–генераторы хаотических колебаний на основе электронных пучков с виртуальным катодом / Глава в монографии "Проблемы метрологии и прикладной электродинамики" / Под ред. А.П. Креницкого. – М.: Радиотехника, 2008. СС. 82–86.
- [2] Е. Н. Егоров, С. А. Куркин, А. Е. Храмов. Влияние двумерных эффектов динамики заряженных частиц на колебания в электронных потоках с виртуальным катодом / Глава в монографии "Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники СВЧ. Т.2 Нестационарные и хаотические процессы" / Под ред. А.А. Короновского, Д.И. Трубецкова, А.Е. Храмова. – М.: Физматлит, 2009.
- [3] Е. Н. Егоров, С. А. Куркин, А. Е. Храмов. Низковольтный виркатор. Нелинейная динамика интенсивного электронного потока с виртуальным катодом / LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2010. – 176 с.
- [4] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Влияние внешнего магнитного поля на формирование и динамику виртуального катода, Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика 16 (4) (2008) 182–201.
- [5] Ю. А. Калинин, С. А. Куркин, Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов, СВЧ–генераторы хаотических колебаний на основе электронных пучков с виртуальным катодом, Успехи современной радиоэлектроники (9) (2008) 53–55.
- [6] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Хаотизация колебаний виртуального катода во внешнем магнитном поле, создаваемом кольцевым магнитом, Изв. РАН. Сер. физическая 73 (12) (2009) 1736–1738.
- [7] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Формирование и динамика виртуального катода в трубчатом электронном пучке во внешнем магнитном поле, ЖТФ 79 (10) (2009) 119–128.
- [8] С. А. Куркин, А. Е. Храмов, Формирование виртуального катода в трубчатом электронном потоке во внешнем магнитном поле, Письма в ЖТФ 35 (1) (2009) 48–54.
- [9] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Нелинейная динамика и хаотизация колебаний виртуального катода в трубчатом электронном потоке во внешнем магнитном поле, Физика плазмы 35 (8) (2009) 684.
- [10] А. Е. Храмов, А. А. Koronovskii, S. A. Kurkin, Numerical study of chaotic oscillations in the electron beam with virtual cathode in the external non-uniform magnetic fields, Phys. Lett. A 374 (2010) 3057–3066.
- [11] С. А. Куркин, А. А. Короновский, Ю. И. Левин, А. Е. Храмов, Широкополосная хаотическая генерация и оптимизация ее характеристик в СВЧ генераторе с электронной обратной связью и магнитной периодической фокусирующей системой, Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика 18 (3) (2010) 104–127.
- [12] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Нелинейная динамика электронного потока с виртуальным катодом во внешнем неоднородном магнитном поле, Письма в ЖТФ 36 (11) (2010) 69–76.
- [13] С. А. Куркин, А. А. Короновский, Е. Н. Егоров, Ю. И. Левин, Р. А. Филатов, А. Е. Храмов, Математическая модель и ее численная реализация для исследования и оптимизации генераторов с электронной обратной связью, Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика 18 (6) (2010) 106–137.

- [14] С. А. Куркин, Влияние шумового разброса электронов по скоростям на динамику электронного потока с виртуальным катодом, Радиотехника и электроника 55 (4) (2010) 1–9.
- [15] С. А. Куркин, А. Е. Храмов, А. А. Короновский, Численное исследование нелинейной динамики виртуального катода в трубчатом электронном потоке с экранированным от внешнего магнитного поля источником электронов, Вестник ТГУ 15 (5) (2010) 1451–1454.
- [16] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Мощность выходного СВЧ-излучения низковольтного генератора на виртуальном катоде с внешним неоднородным магнитным полем, Письма в ЖТФ 37 (8) (2011) 26–33.
- [17] С. А. Куркин, А. Е. Храмов, А. А. Короновский, Генерация хаотических сигналов в низковольтном генераторе на виртуальном катоде с экранированным от внешнего магнитного поля источником электронов, Письма в ЖТФ 37 (3) (2011) 102–109.
- [18] А. Е. Храмов, С. А. Куркин, Е. Н. Егоров, А. А. Короновский, Р. А. Филатов, Программный пакет для исследования и оптимизации нелинейных нестационарных процессов в микроволновых генераторах с электронной обратной связью, Математическое моделирование 23 (1) (2011) 3–18.
- [19] С. А. Куркин, А. Е. Храмов, Формирование и динамика виртуального катода в слабoreлятивистском электронном потоке во внешнем магнитном поле, Материалы VIII Международной школы “Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС–2007)” (9–14 октября 2007 года, Саратов, Россия), 2007, С. 96.
- [20] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Формирование и нелинейная динамика виртуального катода в слабoreлятивистском электронном потоке во внешнем магнитном поле, Тезисы докладов XIV научной школы “Нелинейные волны — 2008”, 2008, С. 99–100.
- [21] С. А. Куркин, А. Е. Храмов, Особенности формирования виртуального катода в трубчатом электронном пучке во внешнем магнитном поле, Материалы 18 Международной Крымской конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2008, С. 631.
- [22] A. Hramov, S. A. Kurkin, A. A. Koronovskii, Effect of external magnetic field on critical current for the onset of virtual cathode in electron beams, Book of Abstracts. EUROEM 2008, 2008, С. 72.
- [23] A. E. Hramov, A. A. Koronovskii, S. A. Kurkin, I. S. Rempen, Nonlinear dynamics of relativistic electron beam with virtual cathode in external magnetic field, Book of Abstracts. EUROEM 2008, 2008, С. 73.
- [24] С. А. Куркин, Численное моделирование нестационарных нелинейных процессов в электронно–волновых системах со сверхкритическими токами, Труды 51-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть 8. Проблемы современной физики, 2008, С. 45.
- [25] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Особенности нелинейной динамики виртуального катода в периодическом магнитном поле, Материалы XIV зимней школы–семинара по СВЧ электронике и радиофизике, 2009, С. 69.
- [26] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Нелинейная динамика и хаотические колебания виртуального катода во внешнем однородном магнитном поле, Материалы XIV зимней школы–семинара по СВЧ электронике и радиофизике, 2009, С. 68.

- [27] С. А. Куркин, Создание программного обеспечения для моделирования процессов в электронных пучках заряженных частиц со сверхкритическими токами, Сборник трудов конференции молодых ученых. Выпуск 7. Тезисы докладов II сессии научной школы–практикума «Технологии высокопроизводительных вычислений и компьютерного моделирования», 2009, С. 18.
- [28] С. А. Куркин, Особенности нелинейной динамики виртуального катода во внешнем периодическом магнитном поле, Труды XII Всероссийской школы–семинара "Волны–2009 2009, С. 34–35.
- [29] S. A. Kurkin, A. E. Hramov, A. A. Koronovskii, Nonlinear dynamics and wideband chaotic generation in microwave oscillator based on electron beam with virtual cathode, Proceedings of 17th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems NDES–2009, 2009, С. 42–45.
- [30] С. А. Куркин, А. А. Короновский, И. И. Магда, А. Е. Храмов, Управление генерацией широкополосных хаотических колебаний в электронном потоке с виртуальным катодом в неоднородном внешнем магнитном поле, Материалы 19 Международной Крымской конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2009, С. 701.
- [31] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Ю. И. Левин, Влияние шумового разброса электронов на хаотическую динамику электронного потока с виртуальным катодом, Материалы 19 Международной Крымской конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2009, С. 699.
- [32] С. А. Куркин, Нелинейная динамика, хаос и образование структур в электронном потоке с виртуальным катодом в периодическом магнитном поле, Тезисы докладов XV научной школы «Нелинейные волны–2010», 2010, С. 75.
- [33] S. A. Kurkin, A. E. Hramov, A. A. Koronovskii, Influence of electron velocity dispersion on dynamics of electron beam with virtual cathode, Proceedings of 18th IEEE Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems NDES–2010, 2010, С. 50.
- [34] S. A. Kurkin, A. E. Hramov, A. A. Koronovskii, I. I. Magda, Chaotic oscillations control in microwave virtual cathode oscillators, Proceedings of 3rd Chaotic Modeling and Simulation International Conference, 2010, С. 46.
- [35] С. А. Куркин, Особенности формирования виртуального катода в трубчатом релятивистском электронном потоке, Материалы 20 Международной Крымской конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2010, С. 908.
- [36] С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Оптимизация СВЧ генератора широкополосных хаотических сигналов с электронной обратной связью, Материалы IX Международной школы–семинара «Хаотические автоколебания и образование структур», 2010, С. 96.
- [37] С. А. Куркин, Ю. А. Калинин, А. Е. Храмов, А. А. Короновский, Генератор широкополосного шумоподобного сигнала: Патент на изобретение № 2390871, Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС. 27.05.2010. Бюллетень N 15 (2009).
- [38] С. А. Куркин, А. Е. Храмов, А. А. Короновский, Программа двумерного моделирования слабoreлятивистских электронных потоков с учетом пространственного заряда во внешнем магнитном поле, Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009611873: Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 10.04.2009 (2009).

КУРКИН Семён Андреевич

НЕЛИНЕЙНЫЕ И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В  
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ “ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОТОК С  
ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ”

Автореферат

---

Подписано к печати 17.05.11.  
Формат 60 × 84 1/16. Бумага “Снегурочка”. Гарнитура “Times”  
Усл. печ. л. 1,39 (1,5). Тираж 120 экземпляров. Заказ 100–Т

---

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