На правах рукописи

Kyp-

КУРКИН Семён Андреевич

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ И ВЗАИМОВЛИЯНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКАХ

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора физико–математических наук

Саратов – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А."

Научный консультант:	доктор физико-математических наук, профессор, <b>Храмов Александр Евгеньевич</b> <b>Комаров Дмитрий Александрович</b> доктор технических наук, АО НПП "Торий", г. Москва, начальник научно-технического центра <b>Лукша Олег Игоревич</b> доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, профессор кафедры "Физическая электроника" <b>Шеин Александр Георгиевич</b> доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,	
Официальные оппоненты:		
Велушая организация:	ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский	

Ведущая организация: ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

Защита состоится "29" июня 2017 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.242.08 при ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А." по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корп. 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А." и на сайте www.sstu.ru.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

С.В. Астахов

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность работы.

Интенсивные пучки заряженных частиц<sup>1</sup>, включая релятивистские электронные потоки (РЭП), имеют огромное значение для современной физики плазмы и высокомощной вакуумной электроники СВЧ и ТГц диапазонов в связи с широким спектром их применений в различных областях науки и техники, таких как нагрев плазмы, ядерный синтез с инерционным удержанием плазмы, генерация и усиление высокомощного СВЧ и ТГц излучения, ускорение ионов и в ряде других. Хорошо известно, что интенсивные электронные потоки демонстрируют сложные режимы динамики, включая развитие различных типов неустойчивостей, таких как пирсовская, бурсиановская, тококонвективная, слиппинг, диокотронная, кинематическая и другие.

Эти неустойчивости могут играть как положительную роль, поскольку, например, на основе бурсиановской или пирсовской неустойчивостей функционируют перспективные мощные генераторы на виртуальном катоде (ВК), так и оказывать отрицательное влияние, ограничивая режимы работы мощных электронных приборов.

Исследованию неустойчивостей в электронных потоках посвящено большое количество работ, включая фундаментальные труды В.Р. Бурсиана, J.R. Pierce, A.A. Рухадзе, Л.С. Богданкевич, R.C. Davidson, M.B. Незлина, R.B. Miller, A.H. Диденко, С.А. Кареtanakos, Д.И. Трубецкова, R.A. Mahaffey, J. Golden, Я. Красика, И.И. Магда, D.J. Sullivan, V.L. Granatstein, A.E. Дубинова, В.Д. Селемира, Ю.П. Блиоха, Е. Schamiloglu, B.B. Godfrey, J.A. Rome, А.Г. Шеина, М.И. Петелина, Н.С. Гинзбурга, В.Е. Запевалова, В.П. Тараканова и др.

Условия для одновременного развития нескольких неустойчивостей часто возникают в потоках заряженных частиц. До настоящего времени такие сложные режимы динамики электронного потока с одновременно сосуществующими неустойчивостями, а также влияние различных факторов (параметров эмиссии, внешних магнитных полей, внешней обратной связи и др.) на развитие данных неустойчивостей остаются практически неизученными. Их исследование имеет существенное значение для дальнейшего развития устройств мощной электроники СВЧ и ТГц диапазонов, в особенности приборов с ВК, в которых режимы с сосуществованием неустойчивостей являются типичными. Повышенный интерес к виркаторным системам обусловлен их важными преимуществами: простота конструкции, возможность работы без внешнего магнитного поля, высокий уровень выходной мощности, низкие требования к качеству электронного потока, возможность генерации широкополосного сигнала.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Пучки, для которых нельзя пренебрегать силами пространственного заряда.

Исследование особенностей одновременного развития в электронных потоках нескольких неустойчивостей практически невозможно без привлечения современных эффективных средств математического (в том числе, численного) моделирования вследствие сложности протекающих в них нелинейных процессов. В то же время проведение детальных экспериментальных исследований является крайне трудоемким и дорогостоящим, а иногда и невозможным.

Существующие программные коды (например, Magic, Magy, CST Studio, VSim, Neptune, WARP) в силу своей универсальности и других причин в ряде случаев не подходят или являются неоптимальными для решения задачи исследования развития и взаимодействия неустойчивостей в интенсивных потоках заряженных частиц. В частности, невозможно проконтролировать, какие математические и алгоритмические основы были реализованы в таких программных комплексах.

Вышесказанное определило актуальность настоящей работы и следующие из неё цели и задачи.

Целью диссертационной работы является развитие методов математического моделирования, создание моделей, алгоритмов, комплекса программ и разработка методов для анализа физических процессов развития и взаимовлияния неустойчивостей в интенсивных электронных потоках в системах виркаторного типа, а также исследование с использованием математического моделирования процессов генерации и усиления сигналов в пучковых системах с виртуальным катодом, основанных на обнаруженных физических эффектах.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка одномерной и 2.5-мерной самосогласованных математических моделей и их эффективная программная реализация в виде комплекса программ для анализа динамики интенсивных электронных потоков.

2. Исследование механизмов и закономерностей развития и взаимодействия неустойчивостей в автономном и неавтономном генераторах с интенсивными нерелятивистскими электронными потоками с ВК в рамках разработанной одномерной математической модели.

3. Анализ в рамках 2.5-мерной математической модели влияния параметров системы на условия и механизмы развития в слаборелятивистском электронном потоке неустойчивости Бурсиана.

4. Разработка и применение модификации 2.5-мерной самосогласованной модели, позволяющей задавать внешние неоднородные магнитные поля, начальный шумовой разброс электронов по скоростям и углам влёта, а также модуляцию эмиссии электронного потока, в системе со слаборелятивистским пучком с ВК. 5. Исследование условий, механизмов и динамики развития и взаимодействия неустойчивостей в интенсивных РЭП со сверхкритическими токами, а также выходных характеристик релятивистского виркатора с использованием лицензионного программного продукта для трёхмерного электромагнитного PIC-моделирования CST Particle Studio и комплекса разработанных программных модулей для обработки данных моделирования.

6. Исследование и оптимизация релятивистских генератора и усилителя с интенсивным РЭП в режиме развития неустойчивости Бурсиана и дополнительной обратной связью (моделей виртода-генератора и виртода-усилителя) с использованием лицензионного программного продукта CST Particle Studio.

**Предметом исследования** являются неустойчивости, развивающиеся в интенсивных электронных потоках в различных моделях CBЧ-систем с виртуальным катодом.

**Научная новизна работы** соответствует пунктам 1-5, 7 паспорта специальности 05.13.18 и заключается в следующем:

1. Разработана одномерная самосогласованная квазистатическая математическая модель, основанная на методе крупных частиц, и её эффективная программная реализация для анализа процессов генерации в системе с интенсивным электронным потоком при развитии в ней неустойчивости Бурсиана (генераторе на ВК), как в автономном случае, так и под воздействием внешнего сигнала, отличающаяся возможностью учёта ввода внешнего модулирующего сигнала и регистрации выходного сигнала, а также дополнительного торможения электронного потока (пп. 1, 3, 4, 7 паспорта специальности 05.13.18).

2. Разработана стационарная одномерная аналитическая модель электронного потока с ВК под воздействием внешнего сигнала, приводящего к скоростной модуляции пучка, отличающаяся учётом влияния внешнего сигнала вместе с дополнительным торможением (пп. 2, 7 паспорта специальности 05.13.18).

3. В рамках разработанных одномерных численной и аналитической моделей выявлены закономерности и особенности развития неустойчивости Бурсиана и образования ВК в электронном потоке в автономном генераторе и её взаимодействия с кинематической неустойчивостью в неавтономной системе (модели низковольтного генератора на ВК под внешним воздействием). При превышении мощностью внешнего воздействия критического значения и при близком соответствии частоты внешнего воздействия и собственной частоты генератора происходит существенное увеличение выходной мощности виркатора, что находится в хорошем согласии с известными экспериментальными данными (пп. 5, 7 паспорта специальности 05.13.18).

4. Создана 2.5-мерная самосогласованная квазистатическая математическая модель, основанная на методе крупных частиц, и её эффективная про-

5

граммная реализация для анализа нестационарной динамики интенсивных слаборелятивистских электронных потоков при развитии в них неустойчивостей, отличающаяся возможностью учёта внешних магнитных полей (в том числе, неоднородных, создаваемых магнитной периодической фокусирующей системой) и степени экранирования источника электронного потока от внешнего магнитного поля, начального шумового разброса электронов по скоростям и углам влёта, модуляции эмиссии электронного потока в рамках термоэлектронной и автоэлектронной моделей эмиссии (пп. 1, 3, 4, 7 паспорта специальности 05.13.18).

5. С использованием разработанной 2.5-мерной математической модели впервые проведено исследование влияния различных параметров системы со слаборелятивистским электронным потоком (величины и конфигурации внешнего магнитного поля, параметров пучка, параметров модуляции эмиссии и начального шумового разброса электронов) на условия (критические токи) и механизмы развития в ней неустойчивости Бурсиана. В частности, обнаружено, что с ростом магнитного поля критический ток уменьшается, а также существует характерная величина внешнего магнитного поля, при которой критический ток оказывается минимальным. На основании стационарной математической модели, учитывающей баланс действующих на границу электронного потока сил, получено аналитическое выражение для данного характерного магнитного поля. Установлено, что переключение режимов динамики в подобной системе обусловлено образованием и взаимодействием электронных структур (пп. 2, 5 паспорта специальности 05.13.18).

6. Впервые введено понятие эффективной плазменной частоты и исследовано её поведение при изменении управляющих параметров системы с интенсивным электронным потоком (пп. 2, 5 паспорта специальности 05.13.18).

7. Впервые изучено влияние параметров модуляции эмиссии пучка на динамику интенсивного слаборелятивистского электронного потока в режиме развития неустойчивости Бурсиана и выходные характеристики генерации в подобной системе в рамках разработанной 2.5-мерной модели. Проанализировано влияние начального шумового разброса электронов по скоростям и углам влёта на выходные характеристики генератора на ВК. Впервые обнаружено, что при превышении дисперсией шумового разброса критического значения происходит срыв генерации в системе (п. 5 паспорта специальности 05.13.18).

8. Проведены исследования условий, механизмов и динамики развития и взаимодействия неустойчивостей в интенсивных релятивистских и ультрарелятивистских электронных потоках со сверхкритическими токами, а также выходных характеристик (мощности генерации, спектрального состава и др.) релятивистского виркатора с использованием лицензионного программного продукта для трёхмерного электромагнитного PIC-моделирования CST Particle Studio и комплекса разработанных программных модулей для обработки данных моделирования. Разработан эффективный метод подавления численных неустойчивостей при моделировании релятивистских систем в CST Particle Studio, основанный на введении искусственной среды с потерями (пп. 1, 3, 4, 5 паспорта специальности 05.13.18).

9. Обнаружено, что неустойчивость Бурсиана в РЭП способствует развитию диокотронной неустойчивости, а их взаимодействие приводит к формированию неоднородного в азимутальном направлении виртуального катода в виде N отдельных вращающихся электронных сгустков, при этом количество сгустков возрастает с ростом тока пучка. Формирование в РЭП электронных сгустков в азимутальном направлении существенно влияет на условия образования ВК в системе, способствуя его развитию и, как следствие, приводя к снижению критического тока, что обуславливает характерный для РЭП вид зависимостей данной величины от внешнего магнитного поля (п. 5 паспорта специальности 05.13.18).

10. Создана математическая аналитическая модель, позволяющая выявить и объяснить с позиции равновесного заряда физические причины, ответственные за увеличение числа сгустков в системе с ростом тока пучка. Полученные аналитические результаты продемонстрировали хорошее соответствие результатам численного моделирования (пп. 2, 5 паспорта специальности 05.13.18).

11. Впервые изучена взаимосвязь характеристик излучения в СВЧ генераторе на основе РЭП со сверхкритическим током с динамикой электронных сгустков, формирующихся вследствие развития неустойчивостей; при этом выявлено, что частота выходного излучения скачкообразно возрастает с ростом числа сгустков N. Детально изучены режимы с развитыми высшими гармониками основной частоты осцилляций ВК в подобной системе. Впервые обнаружен и исследован эффект мультистабильности в подобной системе (п. 5 паспорта специальности 05.13.18).

12. Проведены исследования релятивистских генератора и усилителя с интенсивным РЭП в режиме развития неустойчивости Бурсиана и дополнительной обратной связью (моделей виртода-генератора и виртода-усилителя) с использованием лицензионного программного продукта для трёхмерного электромагнитного PIC-моделирования CST Particle Studio и комплекса разработанных программных модулей для обработки данных моделирования; при этом усилительная схема предлагается впервые (пп. 1, 3, 4, 5 паспорта специальности 05.13.18).

13. Проведено трёхмерное численное моделирование виртода-генератора с целью анализа его характеристик и происходящих в нём процессов при развитии в электронном потоке неустойчивостей. Выявлен один из механизмов, приводящих к ограничению импульса выходного СВЧ-излучения в виртоде-

генераторе, связанный с переключением моды колебаний электромагнитного поля в одной из секций виртода, что ведёт к существенному снижению эффективности взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем. Проведено сравнение полученных в ходе численного моделирования результатов с известными экспериментальными работами и получено хорошее согласие численных результатов и экспериментальных данных (пп. 5, 7 паспорта специальности 05.13.18).

14. Предложена новая схема усилителя СВЧ-сигнала высокой мощности, основанная на схеме релятивистского виртода-генератора. С помощью разработанной модели проведено трёхмерное численное моделирование усилителя и получены зависимости выходных характеристик виртода-усилителя от параметров входного сигнала и перестройки геометрических параметров прибора. Показано, что виртод-усилитель является эффективным узкополосным усилителем мощного СВЧ-излучения с возможностью перестройки усиливаемой частоты (п. 5 паспорта специальности 05.13.18).

### Основные результаты и положения, выносимые на защиту

1. Предложены математические модели и программный комплекс на их основе, позволяющие исследовать процессы развития и взаимовлияния неустойчивостей в автономных и неавтономных системах с интенсивными нерелятивистскими или слаборелятивистскими электронными потоками.

2. В лицензионном программном продукте CST Particle Studio с использованием новых методов подавления численных (нефизических) неустойчивостей предложены модели для исследования процессов развития и взаимовлияния неустойчивостей в интенсивных релятивистских электронных потоках. Дополнительно разработан комплекс программ, который с использованием эффективных математических методов позволяет обрабатывать, анализировать и интерпретировать данные численного моделирования электронных потоков в режимах развития неустойчивостей, полученные, в частности, при расчёте моделей в среде CST Particle Studio.

3. Подача внешнего гармонического сигнала, ведущего к модуляции электронного потока, на частоте, близкой к собственной частоте генератора на ВК, приводит к увеличению мощности выходного сигнала в системе, что хорошо согласуется с натурным экспериментом.

4. Предложена новая схема эффективного СВЧ усилителя мощных сигналов на основе релятивистского электронного потока с ВК.

5. Величина внешнего магнитного поля оказывает существенное влияние на величину критического тока, при котором в системе с интенсивным электронным потоком развивается неустойчивость Бурсиана, при этом характер зависимости критического тока от внешнего магнитного поля качественно различается для случаев слабого и сильного релятивизма.

6. Совместное развитие и взаимодействие диокотронной и бурсиановской

неустойчивостей в релятивистском электронном потоке приводит к формированию в азимутальном направлении вращающихся электронных сгустков, представляющих собой неоднородный и нестационарный ВК; при этом количество сгустков N определяется величинами тока пучка и внешнего магнитного поля, с увеличением которых N демонстрирует тенденцию к росту. Основная частота выходного сигнала в такой системе скачкообразно возрастает с ростом N.

7. Проведена интерпретация данных, полученных в ходе натурных экспериментов с низковольтным виркатором и релятивистским виртодом, на основе результатов моделирования таких систем с использованием разработанных математических моделей и новых методов обработки данных моделирования.

Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем.

– Научная значимость определяется тем, что разработанный в настоящей работе комплекс математических моделей, методов и программ позволяет эффективно исследовать новые физические явления в различных системах с интенсивными электронными потоками при развитии в них неустойчивостей, а также изучать их взаимовлияние. Полученные результаты создают фундаментальную теоретическую базу для решения поставленных задач, при реализации которых использовались среды программирования Lazarus, Matlab, лицензионный программный продукт CST Particle Studio, язык программирования Visual Basic for Application.

Практическая значимость обусловлена разработанным в настоящей работе комплексом математических моделей, методов и программ и полученными с помощью него результатами, открывающими возможность разработки новых методов подавления неустойчивостей, поиска новых принципов генерации и усиления электромагнитного излучения с использованием режимов, характеризующихся развитием неустойчивостей в электронном потоке, повышения эффективности работы систем ускорения ионных потоков, содержащих интенсивные электронные пучки и др. Полученные результаты полезны для оптимизации существующих устройств электроники больших мощностей, ускорителей, коллайдеров, узлов установок управляемого термоядерного синтеза, в которых используются протяжённые пучки заряженных частиц, где носители заряда транспортируются на значительные расстояния или находятся в пространстве дрейфа длительное время, совершая значительное число колебаний (например, в ловушке Пеннинга, используемой для анализа свойств ионов, а также для реализации квантовых вычислений).

При выполнении диссертационной работы предложен ряд решений и компьютерных программ, которые защищены патентами и свидетельствами Российской Федерации. Результаты диссертации были использованы при выполнении ряда НИР и научных грантов, а также в учебном процессе.

Личный вклад. Все основные результаты, выводы, положения, выносимые на защиту, информационное обеспечение, на которых основана диссертация, получены лично автором, либо под его руководством. В совместных работах автору принадлежит ведущая роль в разработке общей концепции работы, её структуры, методик исследований, создании математических моделей изученных явлений и программ на их основе. Под научным соруководством автора защищена диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук Фроловым Н.С. Все патенты №№ 2608544, 2444081, 2431902, 2431901, 2390871 выполнены в соавторстве, при этом основные идеи патентуемых технических решений принадлежали автору диссертации. Автором диссертации были разработаны алгоритмы программ и получены свидетельства о государственной регистрации компьютерных программ в Роспатенте, зарегистрированные под №№ 2016619620, 2016619117, 2016614534, 2016614533, 2016614531, 2016614530, 2016611255, 2015662441, 2015611059, 2014 610496, 2013611206, 2009611873. Эти программы используются не только в исследовательских целях, но и в учебном процессе.

Достоверность полученных результатов обеспечивается адекватностью применённых моделей, корректностью исходных и упрощающих допущений, использованием уравнений, методов и подходов, которые строго обоснованы в научной литературе, апробированы и хорошо себя зарекомендовали при проведении научных исследований. Достоверность результатов подтверждается их соответствием современным физическим представлениям, верификацией при разнообразном тестировании, непротиворечивостью достоверным известным результатам, сопоставлением различных подходов. Ряд численных результатов, полученных в настоящей работе, согласуется с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты диссертации использовались при выполнении ряда НИР (в рамках грантов РФФИ, РНФ, Президента РФ, ФЦП, Минобрнауки), а также докладывались и обсуждались на следующих конференциях: VIII, IX, X Международная школа-семинар "Хаотические автоколебания и образование структур" (Саратов, 2010, 2013, 2016); научная школа "Нелинейные волны - 2008, 2010, 2016" (Нижний Новгород, 2008, 2010, 2016); 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Севастополь, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016); EUROEM 2008 (Lausanne, Switzerland, 2008); 51-я научная конференция МФТИ "Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук" (Долгопрудный, 2008); XIV, XV, XVI зимняя школа-семинар по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 2009, 2012, 2015); конференция молодых учёных "Технологии высокопроизводительных вычислений и компьютерного моделирования" (Санкт-Петербург, 2009); всероссийская школа-семинар "Волны - 2009", "Волны - 2011", "Волны - 2014", "Волны - 2015", "Волны - 2016" (МГУ, 2009, 2011, 2014, 2015, 2016); 17th, 18th, 21st International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems NDES-2009, NDES-2010, NDES-2013 (Switzerland, 2009; Dresden, Germany, 2010; Bari, Italy, 2013); 3rd Chaotic Modeling and Simulation International Conference (Chania, Crete, Greece, 2010); CST European User Conference (Berlin, Germany, 2014; Darmstadt, Germany, 2015; Strasbourg, France, 2016); Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 2014); 40th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS 2014) and 20th International Conference on High-Power Particle Beams (Beams 2014, Washington DC, USA); X, XI Всероссийская конференция молодых учёных "Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика" (Саратов, 2015, 2016); 40th, 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THZ 2015, Hong Kong, China, 2015; IRMMW-THZ 2016, Copenhagen, Denmark, 2016); 42nd IEEE International Conference on Plasma Science (Belek, Antalya, Turkey, 2015); 6th Euro-Asian Pulsed Power Conference with the 21st International Conference on High-Power Particle Beams and the 15th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation (Estoril, Portugal, 2016); 3rd International Conference in Information and Communication Technologies (ICIT-2016, Capatob, 2016); 15th, 17th IEEE International Vacuum Electronic Conference (IVEC 2014, IVEC 2016, Monterey, California, USA).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 119 работ. Из них 25 статей в журналах, входящих в систему цитирования Web of Science; 8 статей в журналах, входящих в систему цитирования Scopus; 9 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК Минобрнауки РФ; 3 главы в монографиях; 5 патентов и 12 свидетельств о регистрации программного обеспечения; 57 тезисов в трудах всероссийских и международных конференций.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 318 наименований. Работа изложена на 318 страницах, содержит 100 иллюстраций и 1 таблицу.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертации, приведено описание современного состояния проблемы и обоснована актуальность и научная новизна работы, сформулированы цель и методы исследования, изложены научная концепция диссертации, основные результаты работы, её практическая ценность, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и основных публикациях.

В первой главе диссертации приводится описание разработанной одномерной самосогласованной квазистатической математической модели, основанной на методе крупных частиц, для анализа процессов генерации в системе с интенсивным электронным потоком при развитии в ней неустойчивости Бурсиана, а также основные результаты проведённого анализа. Неустойчивость Бурсиана возникает в электронном потоке, распространяющемся в пространстве дрейфа без положительного ионного фона при превышении его током критической величины (предельного вакуумного тока) и проявляется в образовании виртуального катода (ВК). Виртуальный катод — это электронный сгусток (см. рис. 1), образующийся в потоке за счёт действия сил пространственного заряда и отражающий часть пучка обратно к плоскости инжекции.

Виртуальный катод совершает колебательные движения, что приводит к модуляции электронного потока в пространстве дрейфа (рис. 1) на частоте собственных колебаний  $\omega_{VC}$ , которая пропорциональна плазменной частоте пучка  $\omega_p$ . Таким образом, ВК реализует распределённую обратную связь в пучке, что является основным фактором, способствующим процессам генерации в подобных системах (виркаторах, отражательных триодах, виртодах, редитронах и др.) СВЧ излучения.

На рис. 1а изображена модель генератора на ВК без внешнего воздействия (автономная модель), в которой нерелятивистский электронный поток инжектируется с начальной скоростью  $v_0$  и плотностью заряда  $\rho_0$  в дрейфовую камеру длиной L, между входной и выходной сетками которой имеется заданная тормозящая разность потенциалов  $\Delta \varphi$ . В модели генератора под внешним воздействием (неавтономной модели, рис. 16) перед дрейфовой камерой располагается модулятор длиной  $L_m$ , и инжекция пучка происходит с левой границы модулятора. Заметим, что одномерное приближение динамики пучка оказывается справедливым в случае сильно замагниченного электронного потока, когда его поперечными движениями можно пренебречь, или в случае очень широкого пучка по сравнению с поперечными размерами системы.

В схеме автономного генератора на ВК предусмотрена возможность вывода сигнала, а в схеме генератора под внешним воздействием — возможность ввода и вывода сигналов с помощью двух спиральных электродинамических структур. Для модели с внешним воздействием входная спираль (6 на рис. 16) занимает пространство перед камерой дрейфа (модулятор):  $x \in [-L_m; 0], L_m$ – длина модулятора и входной спирали. Внешний сигнал подаётся на левую границу спирали. Выходная спираль длиной  $L_{out}$  (4 на рис. 1) расположена в камере дрейфа в области ВК и занимает промежуток  $x \in [0; L_{out}]$ . Возможность учёта ввода внешнего модулирующего сигнала и регистрации выходного сигнала составляет один из пунктов новизны разработанной модели.

В разработанной математической модели генератора на ВК для моделирования динамики электронного потока используется метод крупных частиц (макрочастиц). Предполагается, что исследуемая система содержит нереляа



Рис. 1: Схематическое изображение исследуемой одномерной модели (a) автономного генератора на ВК и (б) генератора под внешним воздействием. Здесь 1 – электронный поток, 2 и 3 – входная и выходная сетки пространства дрейфа (дрейфовой камеры) соответственно, 4 – выходная (длиной  $L_{out}$ ) спиральная электродинамическая структура для вывода сигнала, 5 – входная сетка модулятора, 6 – входная (длиной  $L_m$ ) спиральная электродинамическая структура для ввода сигнала;  $V_{ext}$  и  $V_{out}$  – входной (внешний) и выходной сигналы соответственно; BK – схематическое изображение виртуального катода. Модулятор с элементами 5 и 6 присутствует только в неавтономной модели генератора.

тивистский электронный поток, поэтому собственные магнитные поля для него пренебрежимо малы. Действительно, отношение сил  $F_B$  и  $F_E$ , обусловленных соответственно наличием собственных магнитного и электрического полей пучка, имеет следующий вид:

$$k_B = \left| \frac{F_B}{F_E} \right| = \frac{v_0}{c}.$$
 (1)

Очевидно, что  $k_B \rightarrow 0$  в нерелятивистском и слаборелятивистском пределах. Вихревыми электромагнитными полями в данном случае также можно пренебречь, т.к. изменение самосогласованного электрического поля в системе оказывается адиабатически медленным процессом в силу невысоких скоростей движения электронного потока и невыполнения в исследуемой системе условия для возникновения квадратичной пространственной группировки в пучке (условия синхронизма бегущей электромагнитной волны электродинамической системы и электронного потока). Также в случае нерелятивистского или слаборелятивистского электронного потока можно не учитывать волновые свойства поля пространственного заряда пучка вследствие низких скоростей движения частиц и малости длины системы, по сравнению с характерной длиной волны происходящих в системе процессов, т.е. считать, что выполняется принцип дальнодействия. Описанный подход называется квазистатическим приближением.

Важно отметить, что при моделировании нерелятивистских и слаборелятивистских электронных систем использование одномерных и 2.5-мерных моделей в ряде случаев является более эффективным: они позволяют проводить расчёты намного быстрее при сохранении необходимой точности результатов, что даёт возможность перебора большого массива управляющих параметров.

Рассмотрим вначале модель автономного генератора на ВК, развитую применительно к схеме, изображённой на рис. 1а. Уравнения движения крупных частиц в данной системе в одномерном случае переписываются в безразмерных переменных в следующем виде:

$$\frac{dv_i}{dt} = E(x_i(t), t), \qquad \frac{dx_i}{dt} = v_i, \qquad i = 1, 2, \dots, N,$$
 (2)

где t – время, E – напряжённость электрического поля пространственного заряда, i – номер крупной частицы, N – количество частиц. Каждый временной шаг в пространство дрейфа через входную сетку с начальной скоростью  $v_0$  инжектируется новая крупная частица.

Для вычисления на каждом временном шаге распределения электрического потенциала  $\varphi(x)$  в системе по известному распределению пространственного заряда  $\rho(x)$  используется одномерное уравнение Пуассона, которое в безразмерной форме имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\alpha^2 \rho\left(x\right),\tag{3}$$

где  $\alpha = \omega_q L/v_0 (L - длина пространства взаимодействия, <math>v_0$  – скорость макрочастиц на входе в пространство взаимодействия,  $\omega_q$  – редуцированная плазменная частота) – безразмерный параметр Пирса<sup>2</sup>, который пропорционален току пучка I как  $\alpha \sim \sqrt{I}$ . Уравнение Пуассона решается со следующими граничными условиями:

$$\varphi(0,t) = 0, \quad \varphi(1,t) = \Delta \varphi.$$
 (4)

Напряжённость электрического поля пространственного заряда E находится по определению как  $E(x) = -\nabla \varphi(x)$ . Возможность учёта дополнительного торможения электронного потока составляет один из пунктов новизны разработанной модели.

Для численного моделирования процесса распространения волны в спирали используется метод эквивалентных схем, при этом система телеграфных

 $<sup>^2</sup>Далее будем его также называть параметром тока$ 

уравнений для выходной спирали имеет следующий вид:

$$\frac{\partial V_{sp}^{out}}{\partial t} = -\frac{1}{C_0} \frac{\partial I_{sp}^{out}}{\partial x} + \frac{\kappa}{C_0} \frac{\partial \rho}{\partial t}, \qquad \frac{\partial I_{sp}^{out}}{\partial t} = -\frac{1}{L_0} \frac{\partial V_{sp}^{out}}{\partial x} \tag{5}$$

и дополняется граничными условиями:

$$V_{sp}^{out}(0,t) = 0, I_{sp}^{out}(0,t) = 0.$$
 (6)

Здесь  $V_{sp}^{out}(x,t)$  и  $I_{sp}^{out}(x,t)$  – напряжение и ток в выходной спирали,  $C_0$  и  $L_0$  – погонные ёмкость и индуктивность на единицу длины спирали, соответственно,  $\kappa$  – сопротивление связи спиральной системы с электронным потоком. Последнее слагаемое в первом уравнении (5) определяется током пронизывающего спираль пучка и вычисляется на каждом временном шаге на основании результатов самосогласованного решения уравнений движения крупных частиц (2) и уравнения Пуассона (3). В качестве выходного сигнала рассматривается напряжение на правой границе спирали  $V_{out} = V_{sp}^{out}(L_{out}, t)$ , наводимое пронизывающим её электронным потоком.

Интегральная выходная мощность при моделировании вычисляется по следующей формуле:

$$P = \frac{1}{(T - T_{tr})\kappa} \int_{T_{tr}}^{T} V_{out}^2(t) dt,$$
(7)

где  $T_{tr}$  – длительность переходного процесса, T – полное время расчёта.

При численном моделировании процессов в рассматриваемой низковольтной системе параметры схемы были выбраны следующим образом: M = 400– число ячеек сетки,  $h_x = 1/M = 0.0025$  – шаг пространственной сетки,  $N_0 = 10, \Delta t = h_x/N_0 = 0.00025$  – шаг по времени.

Для численного интегрирования уравнений движения (2) используется разностная схема "с перешагиванием". Самосогласованным образом с уравнениями движения на сетке численно интегрируется уравнение Пуассона (3) с учётом граничных условий (4) с использованием метода распространения вектора ошибки, который требует меньше машинных операций, чем традиционный метод прогонки.

Вышеописанная математическая модель была реализована в виде программного кода в среде разработки Lazarus.

Рассмотрим основные результаты численного исследования модели генератора (рис. 1а) с интенсивным электронным потоком с ВК (низковольтного виркатора). Было изучено влияние основных управляющих параметров модели (параметра тока  $\alpha$  и тормозящей разности потенциалов  $\Delta \varphi$ ) на развитие в системе неустойчивости Бурсиана. Обнаружено, что зависимость интегральной выходной мощности генерации низковольтного виркатора от тормозящей разности потенциалов (кривая 1 на рис. 2) демонстрирует при  $\Delta \varphi \sim 0.4 \div 0.45$ 



Рис. 2: Зависимости нормированной интегральной выходной мощности  $P/P_{max}$  (кривая 1) и основной частоты генерации  $f_{VC}$ (кривая 2) автономного генератора на ВК от тормозящей разности потенциалов  $\Delta \varphi$ при фиксированном параметре тока  $\alpha =$ 0.9;  $P_{max}$  – максимальная выходная мощность; безразмерная длина выходной спирали  $L_{out} = 0.5$ .

особенность, заключающуюся в резком увеличении мощности выходного излучения, которая сменяется затем спадом. Это обусловлено тем, что отрезок спиральной замедляющей системы при  $\Delta \varphi = 0.44$  максимально захватывает область формирования ВК, и при этом наиболее эффективно возбуждается волна в спиральной системе. Характерное уменьшение частоты генерации (кривая 2 на рис. 2) в области  $\Delta \varphi \sim 0.4 \div 0.45$  практически в 2 раза связано с переключением колебательных режимов динамики виртуального катода при изменении тормозящей разности потенциалов.

Рассмотрим модель генератора на ВК под внешним воздействием, развитую применительно к схеме, изображённой на рис. 16. Уравнения движения крупных частиц в модуляторе данной системы в одномерном случае переписываются в безразмерных переменных в следующем виде:

$$\frac{dv_i}{dt} = E_m(x_i(t), t), \qquad \frac{dx_i}{dt} = v_i, \qquad i = 1, 2, \dots, N_m,$$
(8)

где  $E_m$  – напряжённость электрического поля, создаваемого в модуляторе внешним сигналом, при этом напряжённость электрического поля пространственного заряда в данной области системы предполагается равной нулю  $(E = 0), N_m$  – количество частиц в модуляторе. Каждый временной шаг в модулятор через входную сетку с начальной скоростью  $v_0$  инжектируется новая крупная частица.

Уравнения движения крупных частиц в пространстве дрейфа модели генератора на ВК под внешним воздействием имеют вид, аналогичный уравнениям движения для модели автономного генератора на ВК:

$$\frac{dv_i}{dt} = E(x_i(t), t), \qquad \frac{dx_i}{dt} = v_i, \qquad i = 1, 2, \dots, N_d,$$
(9)

где  $N_d$  – количество частиц в пространстве дрейфа.

Распределение электрического потенциала  $\varphi(x)$  в пространстве дрейфа системы вычисляется, как и в автономной модели, по известному распределению пространственного заряда  $\rho(x)$  с использованием одномерного уравнения Пуассона (3) с граничными условиями (4). В модуляторе уравнение Пуассона не рассчитывается в силу того, что движение крупных частиц в данной области системы определяется только действием внешнего сигнала.

Распределение возбуждаемого внешним сигналом электрического поля в модуляторе находится на основании решения системы телеграфных уравнений, записываемой для эквивалентной схемы входной спирали:

$$\frac{\partial V_{sp}^{in}}{\partial t} = -\frac{1}{C_0} \frac{\partial I_{sp}^{in}}{\partial x}, \qquad \frac{\partial I_{sp}^{in}}{\partial t} = -\frac{1}{L_0} \frac{\partial V_{sp}^{in}}{\partial x}$$
(10)

и дополняется граничными условиями:

$$V_{sp}^{in}(-L_m,t) = V_{ext}, \quad I_{sp}^{in}(-L_m,t) = 0.$$
 (11)

Здесь  $V_{sp}^{in}(x,t)$  и  $I_{sp}^{in}(x,t)$  – напряжение и ток во входной спирали,  $V_{ext}$  – входной сигнал. Тогда электрическое поле, наводимое входной спиралью в модуляторе  $E_m(x,t) = -\nabla V_{sp}(x,t)$ .

При решении уравнений неавтономной модели использовались численные методы, аналогичные применяемым при моделировании автономной системы.

Рассмотрим основные результаты численного исследования модели генератора (рис. 1б) с интенсивным электронным потоком с ВК под внешним воздействием, а также сравним их с известными экспериментальными данными. При подаче на входную спираль внешнего гармонического сигнала в дрейфовую камеру поступает промодулированный по скорости на частоте внешнего воздействия  $\omega_{ext}$  поток электронов. Было обнаружено возрастание выходной мощности при увеличении глубины модуляции до некоторого порогового значения  $X \sim 0.01$ , а затем её спад при X > 0.01 (рис. 3а, кривая 1). Зависимость мощности выходного СВЧ-излучения от частоты внешнего сигнала носит резонансный характер (рис. 36, кривая 1): достигает максимального значения при частоте  $\omega_{ext} \approx \omega_{vc}$  для разных величин тормозящей разности потенциалов между сетками пространства дрейфа. Полученные численные результаты хорошо согласуются с известными экспериментальными данными (см. рис. 3, кривые 2). Обнаруженное поведение зависимостей мощности объясняется с точки зрения изменения эффективности группировки электронного потока в области формирования ВК и выходной спиральной системы при изменении глубины модуляции.

Впервые была построена аналитическая модель для анализа процессов в генераторе на ВК под внешним воздействием, при этом были приняты следующие предположения: 1. ВК является стационарным в пространстве, т.е. формируется на некотором фиксированном расстоянии D от плоскости инжекции электронного потока, совершая при этом колебания во времени; 2. потенциал ВК совершает колебания во времени в соответствии с гармоническим законом  $U_{vc} \cos(\omega_{vc} t)$ , где  $U_{vc}$  – амплитуда колебаний потенциала в точке формирования ВК; 3. электронный поток полностью отражается от ВК; 4. движение пучка можно считать одномерным.



Рис. 3: Численно рассчитанные (кривые 1) и экспериментально полученные (кривые 2) [Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Kalinin Yu.A., Kurkin S.A., Hramov A.E. The effect of an external signal on output microwave power of a low-voltage vircator. Phys. Lett. A. 378 (2014) 2423] зависимости нормированной выходной мощности исследуемой неавтономной системы с BK (*a*) от безразмерной глубины предварительной скоростной модуляции пучка на входе в пространство дрейфа X при  $\omega_{ext} = \omega_{vc}$  и ( $\delta$ ) от нормированной частоты внешнего гармонического сигнала при X = 0.008 для  $\Delta \varphi = 0.47$  (кривые 1) и  $\Delta \varphi = 600$  B (кривые 2);  $\alpha = 0.9$ ,  $P_0$  – выходная мощность автономной системы. Кривая 3 на рис. *a* получена с помощью разработанной аналитической модели при  $\xi = 0.00597$  и  $\mu = 0.0039$ .

Влияние внешнего сигнала в аналитической модели учитывается как предварительная скоростная модуляция электронного потока на входе в пространство дрейфа на частоте внешнего сигнала  $\omega_{ext}$  и с глубиной X. В соответствии со вторым законом Ньютона динамика электронов в пространстве дрейфа описывается следующим уравнением:

$$\ddot{x} = \left( U_{vc} e^{j\omega_{vc}t} - \Delta\varphi \right). \tag{12}$$

Дважды интегрируя (12) с учётом начальных условий:

$$t = t_1, \quad x = 0, \quad \dot{x}(0, t_1) = v_0 \left(1 + X \sin(\omega_{ext} t_1)\right),$$
 (13)

получим выражения для координаты x и угла пролёта электронов  $\phi = \omega_{vc} (t - t_1)$ , отразившихся от ВК и вернувшихся обратно к плоскости инжекции  $(t_1 - \text{момент влёта электрона в пространство дрейфа}):$ 

$$x = (1 + X \sin(\omega_{ext}t_1))(t - t_1) - \frac{U_{vc}}{\omega_{vc}^2} \left( e^{j\omega_{vc}t} - e^{j\omega_{vc}t_1} - j\omega_{vc}e^{j\omega_{vc}t_1}(t - t_1) \right) - \Delta\varphi/2(t - t_1)^2, \quad (14)$$

$$\phi \left(1 + X \sin \left(\omega_{ext} t_1\right)\right) - \mu \left(e^{j\phi} - j\phi - 1\right) e^{j\omega_{vc} t_1} - \xi \phi^2 = 0, \tag{15}$$

где  $\mu = U_{vc}/\omega_{vc}$  и  $\xi = \Delta \varphi \omega_{vc}/2$ . На основе полученного закона изменения угла пролёта электронов и закона сохранения заряда  $I(x,t)dt = I_0 dt_1$  было определено выражение для описания сгруппированного тока пучка:

$$I(t) = I_0 \left( 1 + \frac{1}{\omega_{vc}} \frac{d\phi}{dt_1} \right)^{-1}.$$
 (16)

Здесь величина  $I_0$  – невозмущённый ток пучка в пространстве дрейфа, равный току инжекции. Мощность СВЧ сигнала, регистрируемого спиральной системой, пропорциональна квадрату величины сгруппированного тока и представляется в виде  $P = \kappa I^2$ , где  $\kappa$  – коэффициент связи между электромагнитной волной в спиральной системе и пучком (сопротивление связи).

Анализ разработанной аналитической модели показывает (рис. За, кривая 3), что мощность выходного излучения неавтономного генератора на ВК растёт с увеличением глубины предварительной скоростной модуляции пучка на входе в пространство дрейфа (с увеличением мощности входного сигнала, модулирующего поток по скорости). Такой рост происходит за счёт увеличения тока сгруппированного в области ВК пучка I(t) (16), что объясняется улучшением группировки электронного потока вследствие скоростной модели, при экспериментально реализуемых значениях амплитуды входного сигнала увеличение мощности выходного излучения может достигать  $5 \div 7$  раз. Из рис. За следует, что разработанная аналитическая модель корректно описывает поведение зависимости выходной мощности P(X) при глубине модуляции X < 0.01.

Таким образом, разработанная аналитическая модель позволила выявить характерные особенности взаимодействия кинематической неустойчивости потока, приводящей к пространственной группировке электронов промодулированного по скорости пучка на входе, с бурсиановской неустойчивостью.

Помимо этого, в ходе одномерного численного моделирования была изучена динамика однонаправленно связанных генераторов с интенсивными электронными потоками в режимах развития неустойчивости Бурсиана. Было исследовано влияние внешнего сигнала, генерируемого ведущим генератором, на динамику и выходные характеристики ведомого и показано, что в цепочке генераторов на ВК, связанных однонаправленно, также наблюдается увеличение выходной мощности, физические механизмы которого подобны происходящим в неавтономном генераторе.

Во второй главе диссертации приводится описание разработанной 2.5мерной самосогласованной квазистатической математической модели, основанной на методе крупных частиц, для анализа нестационарной динамики интенсивных слаборелятивистских электронных потоков при развитии в них неустойчивостей. Математическая модель была развита применительно к схеме, показанной на рис. 4а, где изображена дрейфовая камера 1 в виде отрезка цилиндрического волновода длиной L и радиусом R, закрытого с торцов сеточными электродами 2 и 3. Аксиально-симметричный сплошной или трубчатый электронный пучок 4 с током I и заданным распределением частиц по скоростям инжектируется в пространство взаимодействия через входную сетку 2. Обозначим внешний радиус пучка как  $R_b$ , а толщину трубчатого пучка как d. Введём геометрический параметр — нормированный радиус электронного пучка  $\sigma = R_b/R$ . Для вывода мощности в разработанной 2.5-мерной модели, как и в случае одномерной модели, используется отрезок спиральной системы 5.



Рис. 4: (a) Схема исследуемой модели. Здесь 1 — цилиндрическое пространство дрейфа, 2 и 3 — входной и выходной сеточные электроды соответственно, 4 — схематическое изображение электронного пучка, 5 — широкополосный вывод мощности, 6 — магнитная система. ( $\delta$ ) Схематическое представление электронного потока с помощью набора макрочастиц (заряженных колец) в цилиндрической геометрии

Вдоль оси пространства дрейфа прикладывается создаваемое магнитной системой (соленоидом, кольцевым магнитом или магнитной периодической фокусирующей системой) 6 внешнее магнитное поле, которое задаётся либо аналитически (константа во всём пространстве дрейфа), либо на пространственной сетке с использованием конфигурационного файла с данными. Магнитное поле характеризуется параметром B = Max(B(z, r = 0)), равным максимальной величине индукции внешнего магнитного поля на оси симметрии системы. Степень экранирования источника электронного потока от внешнего магнитного поля определяется параметром  $\Delta B = \frac{B-B_k}{B}$ , где  $B_k$  – величина индукции магнитного поля на катоде. Значения параметра  $\Delta B$  лежат в интервале значений от 0 (неэкранированная пушка или магнитоизолированный диод) до 1 (экранированный от магнитного поля катод) и влияют на начальную азимутальную скорость крупных частиц при инжекции (см. формулу (20)). Учёт внешних магнитных полей и степени экранирования источника электронного потока от внешнего магнитного поля составляет один

из пунктов новизны разработанной 2.5-мерной модели исследуемой системы.

Предполагается, что электронный поток слаборелятивистский. Это позволяет, как и в Главе 1, использовать квазистатическое приближение. Система является азимутально симметричной — тогда крупные частицы имеют вид заряженных колец различного радиуса (рис. 4б), и при моделировании рассматривается только верхняя полуплоскость  $(z, r), z \ge 0$  системы  $(z \ u \ r$ продольная и радиальная координата в цилиндрической системе координат).

Для моделирования динамики электронного потока для каждой крупной частицы с номером *i* решались релятивистские уравнения движения, которые в цилиндрических координатах и в безразмерных переменных покомпонентно принимают следующий вид:

$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} - r_i \left(\frac{d\theta_i}{dt}\right)^2 = \gamma_i (-E_r(z_i, r_i) - r_i B_z(z_i, r_i) \frac{d\theta_i}{dt}), \tag{17}$$

$$r_i \frac{d^2 \theta_i}{dt^2} + 2 \frac{dr_i}{dt} \frac{d\theta_i}{dt} = -\gamma_i (B_z(z_i, r_i) \frac{dr_i}{dt} - B_r(z_i, r_i) \frac{dz_i}{dt}),$$
(18)

$$\frac{d^2 z_i}{dt^2} = -\gamma_i (E_z(z_i, r_i) + r_i B_r(z_i, r_i) \frac{d\theta_i}{dt}), \quad i = 1, \dots N,$$
(19)

где  $\gamma_i$  – релятивистский фактор. Здесь  $z_i$ ,  $r_i$  и  $\theta_i$  – продольная, радиальная и азимутальная координаты *i*-й крупной частицы соответственно,  $E_z(z_i, r_i)$  и  $E_r(z_i, r_i)$ ,  $B_z(z_i, r_i)$  и  $B_r(z_i, r_i)$  – продольная и радиальная компоненты напряжённости электрического и индукции магнитного полей в точке нахождения крупной частицы  $(z_i, r_i)$  соответственно, а  $\beta_0 = v_0/c$ .

Начальные условия для уравнений движения в случае инжекции в систему моноскоростного пучка записываются следующим образом:

$$\dot{z}_i = 1, \quad \dot{r}_i = 0, \quad \dot{\theta}_i = \frac{B_z(0, r_i)\Delta B}{2},$$
(20)

где последнее условие записано в соответствии с теоремой Буша.

В случае моделирования системы с прямолинейным электронным потоком, имеющим разброс инжектируемых электронов по скоростям и углам влёта, первые два начальных условия для уравнений движения в (20) принимают следующий вид:

$$\dot{z}_i = (v_0 + \tilde{v})\cos(\tilde{\alpha}), \quad \dot{r}_i = (v_0 + \tilde{v})\sin(\tilde{\alpha}). \tag{21}$$

Здесь  $\tilde{\alpha}$  и  $\tilde{v}$  — случайные величины, определяющие распределения инжектируемых электронов по скоростям и углам влёта. Возможность учёта разброса инжектируемых электронов по скоростям и углам влёта составляет один из пунктов новизны разработанной 2.5-мерной модели исследуемой системы.

Для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда в системе используется уравнение Пуассона, которое в цилиндрической системе координат в двух измерениях принимает следующий вид:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = \alpha^2\rho(z,r), \qquad (22)$$

где  $\alpha$  – параметр Пирса, введённый ранее в одномерной модели. Уравнение Пуассона решается при следующих граничных условиях:

$$\varphi(z=0,r) = 0, \ \varphi(z=1,r) = 0, \ \varphi(z,r=R) = 0, \ \left. \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right|_{r=0} = 0,$$
 (23)

где первые три условия означают, что пучок инжектируется в пространство, ограниченное идеально проводящей поверхностью под нулевым потенциалом, а последнее условие на оси симметрии r = 0 определяется аксиальной симметрией пространства взаимодействия.

Напряжённость поля пространственного заряда определяется численным дифференцированием полученных значений потенциала  $\varphi$  в пространстве дрейфа:

$$E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad E_r = -\frac{\partial \varphi}{\partial r}.$$
 (24)

При численном решении сформулированных уравнений 2.5-мерной математической модели задавалось разбиение пространства дрейфа (вычислительная сетка) с шагами  $h_z = 0.008$  и  $h_r = 0.002$  по продольному и радиальному направлениям соответственно.

Уравнение Пуассона (22)–(23) решается с использованием пятиточечной разностной схемы. Для вычисления плотности пространственного заряда на пространственной сетке используется PIC-метод для двумерного случая<sup>3</sup>. Заметим, что принципиальной особенностью разработанного численного метода взвешивания является то, что каждой крупной частице при инжекции приписывается плотность заряда, и взвешивание производится сразу по плотности, в отличие от классических методов, где крупной частице приписывается постоянный заряд, и текущий "объём" частицы не учитывается. Предложенный подход увеличивает точность моделирования при значительном изменении радиуса макрочастицы и, как следствие, её "объёма".

Численное интегрирование уравнений движения в рассматриваемой модели проводится методом Бо́риса.

Разработан метод моделирования рассматриваемой системы с учётом модуляции эмиссии электронного потока в рамках термоэлектронной и автоэлектронной моделей эмиссии. В данном случае вид плотности тока инжектируемого электронного потока J(t) определяется моделью эмиссии<sup>4</sup> и формой внешнего сигнала. Для моделирования подобной системы инжекция

 $<sup>^{3}\</sup>Pi$ роцедура билинейного взвешивания частиц на пространственной сетке

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>В случае автоэлектронной эмиссии — это закон Фаулера-Нордгейма, а в случае термоэлектронной — закон Чайлда-Ленгмюра.

каждой новой "порции" крупных частиц производится не через равные промежутки времени ( $\Delta t$ ), частота инжекции изменяется с течением времени так же, как и функция J(t). Основные параметры модуляции — глубина  $D = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max}} * 100\%$  ( $I_{max}$  и  $I_{min}$  — максимальное и минимальное значения временной зависимости тока пучка I(t) в плоскости инжекции) и частота модуляции  $f_m$ .

Для предотвращения возбуждения в разностной схеме различных численных неустойчивостей используется цифровая фильтрация величин электрического поля и плотности заряда на пространственных сетках, обеспечивающая эффективное подавление нефизического высокочастотного сеточного шума.

Вышеописанные математическая модель и численные методы были реализованы в виде программного кода в среде разработки Lazarus.

В третьей главе диссертации изложены результаты исследования с помощью разработанной 2.5-мерной математической модели условий и механизмов развития и динамики неустойчивости Бурсиана, приводящей к формированию ВК, в слаборелятивистском электронном потоке в стационарном магнитном поле.

В рамках данной задачи было изучено влияние основных управляющих параметров системы (величины внешнего однородного магнитного поля, степени экранирования источника электронного потока от внешнего магнитного поля, радиуса и геометрии электронного пучка и др.) на критический ток, при котором в электронном потоке начинает развиваться неустойчивость Бурсиана, приводящая к формированию BK, а также на механизмы развития данной неустойчивости.



Рис. 5: Зависимости нормированной величины критической плотности тока трубчатого электронного пучка от величины *B* внешнего магнитного поля для случаев (*a*)  $\Delta B = 1$ при  $\beta_0 = 0.1$ ,  $\sigma = 0.25$ ,  $\sigma = 0.5$  и  $\sigma = 0.75$  (кривые 1, 2 и 3 соответственно); нормировка осуществляется на величину критической плотности тока пучка при B = 0 и  $\sigma = 0.25$  и (*б*)  $\Delta B = 0$  при  $\sigma = 0.5$ ,  $\beta_0 = 0.1$ ,  $\beta_0 = 0.3$  и  $\beta_0 = 0.5$  (кривые 1, 2 и 3 соответственно); нормировка осуществляется на величину критической плотности тока пучка при B = 0и  $\beta_0 = 0.5$ . Величины оптимального магнитного поля  $B_{min}$ , при котором критическая плотность тока минимальна, показаны на рисунке стрелками.

Анализ зависимостей критической плотности тока электронных пучков от величины внешнего однородного магнитного поля показал (см. рис. 5), что

существует оптимальная величина магнитного поля,  $B_{min}$ , при которой критическая плотность тока пучка минимальна. При магнитных полях, меньших оптимальной величины, наблюдается монотонное уменьшение критической плотности тока пучка с увеличением индукции B, при бо́льших 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, определённом аналитически в работе A.A. Рухадзе и Л.С. Богданкевич для случая полностью замагниченного электронного потока. Выявлено, что характерное поведение зависимостей критической плотности тока определяется конкуренцией двух различных типов динамики пространственного заряда в области ВК: продольного и поперечного.

На основании анализа действующих на границу электронного потока сил найдены аналитические выражения для величины  $B_{min}$  оптимального внешнего однородного магнитного поля для случаев экранированного и неэкранированного источника электронов соответственно:

$$B_{min}^{sc} = \frac{1}{R_b} \sqrt{\frac{\sqrt{2m_e}I}{\pi\varepsilon_0\eta\sqrt{W_e}}}, \quad B_{min}^{nsc} = R_{vc} \sqrt{\frac{\sqrt{2m_e}I}{\pi\varepsilon_0\eta\sqrt{W_e}(R_{vc}^4 - R_b^4)}}, \qquad (25)$$

где  $R_{vc}$  – радиус пучка в области ВК, определяемый по результатам численного моделирования,  $W_e$  – начальная энергия электронного потока в эВ.

Впервые введено понятие эффективной плазменной частоты  $\omega_p^{ef}$ , определяемой по характеристикам пучка в области ВК и задающей частоту генерации систем с ВК, и предложена методика её оценки по результатам численного моделирования. Было обнаружено (см. рис. 6), что с ростом тока пучка отношение эффективной плазменной частоты к невозмущённой, определяемой в плоскости инжекции электронного потока в систему, монотонно уменьшается, а с ростом магнитного поля — увеличивается и далее насыщается.



Рис. 6: Зависимость отношения  $k = \omega_p^{ef}/\omega_p$  эффективной плазменной частоты к невозмущённой плазменной частоте (a) от параметра тока  $\alpha$  при B = 20 (кривая 1) и B = 5(кривая 2), (б) от индукции внешнего магнитного поля B при  $\alpha = 30$  (кривая 1) и  $\alpha = 40$ (кривая 2).

Показано, что электронный поток с ВК демонстрирует различные режимы колебаний, включая как регулярные, так и со сложным частотным составом, в зависимости от величин внешнего магнитного поля и тока пучка. Проведен анализ физических процессов и выявлен общий механизм усложнения колебаний ВК в системе с развитой неустойчивостью Бурсиана, связанный с образованием вторичных по отношению к ВК электронных сгустков в пролётном потоке, взаимодействие между которыми через общее поле пространственного заряда определяет возникновение дополнительной внутренней обратной связи. Переход от сложных режимов колебаний к периодическим связан с разрушением вторичных электронных структур в пучке.

На основе разработанной 2.5-мерной самосогласованной квазистатической математической модели проведено исследование влияния внешнего неоднородного магнитного поля на выходные характеристики генерации в системе со слаборелятивистским электронным потоком с ВК. В данном случае внешнее магнитное поле создавалось магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС), для которой были введены следующие управляющие параметры: положение МПФС  $z_m$  в пространстве, определяемое как продольная координата первого магнитного кольца в системе, период  $\Delta z_m$  МПФС, а также число магнитных колец  $N_m$ . Распределение внешнего неоднородного магнитного поля в модели с МПФС B(z, r) находилось путём численного решения уравнений магнитостатики с помощью солвера "Magnetostatic" программного пакета CST Particle Studio и загружалось на пространственную сетку разработанной модели.

Обнаружено, что увеличение величины магнитного поля одного магнита или увеличение числа периодов при использовании магнитной периодической фокусирующей системы приводит к возникновению дополнительных электронных структур в потоке, взаимодействие между которыми, в свою очередь, усложняет колебания пространственного заряда пучка, что ведёт к расширению полосы частот сигнала, генерируемого слаборелятивистским виркатором с МПФС.



Рис. 7: Зависимости нормированной выходной мощности P генератора на ВК с неоднородным внешним магнитным полем (*a*) от безразмерного параметра B магнитного поля при  $\alpha = 10$  (кривая 1) и  $\alpha = 20$  (кривая 2) и (*б*) от нормированной координаты МПФС  $z_m/L$  при B = 40,  $\alpha = 10$  (кривая 1),  $\alpha = 20$  (кривая 2) и  $\alpha = 30$  (кривая 3).

Анализ зависимостей выходной мощности виркатора с МПФС от различных параметров генератора показал (рис. 7), что существуют оптимальные параметры МПФС ( $B_{opt}$ ,  $z_{opt}$  и  $N_m = 1$ ), при которых выходная мощность P максимальна. Условия, накладываемые на достижение наибольших выходной мощности и ширины полосы выходного излучения, являются несовместимыми. Максимальная мощность в системе наблюдается в случае, когда виркатор демонстрирует близкие к периодическим режимы колебаний. Увеличение магнитного поля ( $B > B_{opt}$ ), когда спектр генерации расширяется и становится менее изрезанным, сопровождается резким падением интегральной мощности излучения (рис. 7а), которая уменьшается в 2–3 раза, по сравнению со случаем периодической генерации.



Рис. 8: Нормированные зависимости интегральной выходной мощности слаборелятивистского виркатора от величины дисперсии  $\sigma_v$  плотности распределения электронов по скоростям при дисперсии плотности распределения электронов по углам влёта  $\sigma_{\alpha} = 0.016$ ,  $\alpha = 20, B = 7$  и B = 40 (*a*, кривые 1 и 2 соответственно) и  $B = 7, \alpha = 20, \alpha = 25$  и  $\alpha = 30$ (*б*, кривые 1, 2 и 3 соответственно).

На основе разработанной 2.5-мерной самосогласованной квазистатической математической модели с учётом разброса инжектируемых электронов по скоростям и углам влёта проведено исследование влияния параметров разброса электронов на выходные характеристики слаборелятивистского виркатора. Распределения случайных величин  $\tilde{\alpha}$  и  $\tilde{v}$  (см. выражение (21)) соответствовали экспериментально измеренным в работе<sup>5</sup> по исследованию низковольтного виркатора. Впервые обнаружено, что при превышении дисперсией шумового разброса по скоростям критического значения ( $\sigma_v \sim 2\%$ ) происходит срыв генерации в виркаторе из-за разрушения ВК, как электронной структуры, что выражается в резком уменьшении выходной мощности (см. рис. 8).

В рамках разработанной 2.5-мерной самосогласованной квазистатической математической модели, учитывающей модуляцию эмиссии электронного потока, проведено численное исследование слаборелятивистского виркатора с управляемой эмиссией<sup>6</sup>, когда электронной поток инжектируется в исследуемую систему промодулированным по плотности. Показано, что при настройке

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Ю.А. Калинин, А.Е. Храмов. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния распределения электронов по скорости на хаотические колебания в электронном потоке в режиме образования виртуального катода. ЖТФ. 76 (5) (2006) 25.

 $<sup>^6\</sup>ensuremath{\mathrm{Д}}\xspace{\mathrm{ля}}$ случаев моделей с термоэлектронной и автоэлектронной эмиссией



Рис. 9: Амплитудный спектр выходного сигнала слаборелятивистского виркатора с модуляцией эмиссии при (a)  $\alpha/\alpha_{cr} = 2.21$  ( $\alpha_{cr}$  – критическое значение параметра тока),  $D = 80\%, f_m = f_{VC} = 2.55$  ( $f_{VC}$  – частота свободных осцилляций ВК); (б)  $\alpha/\alpha_{cr} = 1.45$ ,  $D = 100\%, f_m = 1.9$ ; B = 20.

частоты модуляции  $f_m$  на одну из гармоник свободных осцилляций ВК  $f_{VC}$ , D > 80%, и когда параметр тока пучка  $\alpha$  превышает критическое значение более, чем в 2 раза, в выходном спектре происходит существенное увеличение мощности высших гармоник частоты свободных колебаний ВК (см. рис. 9а). В случае меньших токов ( $\alpha < 2\alpha_{cr}$ ) основная составляющая в спектре, которая имеет максимальную амплитуду, определяется частотой модуляции  $f_m$ (см. рис. 9б). На рис. 9а показан случай, когда частота модуляции равна  $f_{VC}$ , и при этом амплитуда третьей гармоники возрастает приблизительно в два раза, по сравнению со случаем на рис. 9б — происходит перекачка энергии из основной спектральной компоненты в более высокочастотные. Данный режим работы виркатора с модуляцией эмиссии является перспективным для многократного увеличения частоты генерации при создании модификации генератора на ВК — виркатора-умножителя частоты.

В четвёртой главе диссертации приводятся результаты исследований, проведённых с использованием лицензионного программного продукта CST Particle Studio. Рассмотрены условия, механизмы и динамика развития и взаимодействия неустойчивостей в интенсивных релятивистских и ультрарелятивистских электронных потоках, а также выходные характеристики (мощность генерации, спектральный состав и др.) релятивистского виркатора. Моделирование в CST Particle Studio основано на совместном самосогласованном решении системы уравнений Максвелла и релятивистских уравнений движения в трёх пространственных измерениях с применением метода крупных частиц. Такой подход является наиболее точным при моделировании электронных систем и позволяет корректно учитывать собственные электрические и магнитные поля электронного потока, их волновые свойства, релятивистские эффекты, вихревые электромагнитные поля, влияние электродинамических структур.

Анализ проводился применительно к схеме релятивистского виркатора, изображённой на рис. 10а, представляющей собой отрезок идеально проводящего цилиндрического волновода 1 (эквипотенциальная камера дрейфа) длиной L и радиусом R, в который с эмиттера 2 инжектируется аксиально симметричный моноскоростной трубчатый или сплошной РЭП с током I и начальной энергией  $W_e$ . С правой стороны располагается цилиндрический коллектор 3 и коаксиальный волноводный вывод мощности. Геометрические параметры системы были выбраны следующими: L = 45 мм, R = 10 мм,  $R_b = 5$  мм, d = 1.5 мм (толщина пучка в случае трубчатой геометрии), что соответствует типичным размерам релятивистского виркатора. Внешнее однородное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  прикладывается вдоль оси волновода.



Рис. 10: (a) Вид сбоку разработанной в CST Particle Studio модели с РЭП; ( $\delta$ ) типичное разбиение пространственной сетки в плоскости (y, z); (e) разбиение эмитирующей поверхности на элементарные эмиттеры. На рисунках 1 – цилиндрическая эквипотенциальная камера дрейфа, 2 – эмиттер, 3 – цилиндрический коллектор, 4 – выходной коаксиальный волноводный порт; стрелками на рис. (a) обозначено направление вывода мощности. Ток пучка I = 50 кА, индукция внешнего магнитного поля B = 0.4 Тл.

Перед началом расчётов задавался примерный диапазон частот, предположительно соответствующий протекающим в системе процессам, который определял шаги разбиения пространственной сетки и шаг по времени.

Эмиссия электронного потока в систему осуществляется с кольцевого элемента из идеально проводящего материала (эмиттера), на торцевой части которого задаётся специальный объект среды CST Particle Studio — "Particle Area Source" (см. рис. 10в). Используется модель постоянной эмиссии.

В качестве граничных условий для рассматриваемой модели в случае стенок из идеального проводника используются электрические граничные условия ( $E_{\tau} = 0$ , где  $E_{\tau}$  – тангенциальная составляющая электрического поля). Вывод мощности из системы осуществляется с помощью специального объекта среды CST Particle Studio — волноводного порта (Waveguide Port) 4, подключённого к выходной части схемы (см. рис. 10а).

При проведении расчётов в программном продукте CST Particle Studio могут возникать нефизические эффекты, связанные с развитием численных неустойчивостей (в частности, черенковской численной неустойчивости). В результате, в спектре выходного сигнала могут появляться нереализующиеся в реальном приборе частотные компоненты (см., например, диапазон 600 ÷ 700 ГГц на рис. 11). Для устранения подобных нефизических эффектов был предложен метод, основанный на введении в схему искусственной среды с потерями с такой дисперсией, что в области рабочих частот она соответствует вакууму, а для диапазона частот, возбуждаемых численной неустойчивостью, является сильно затухающей (с коэффициентом передачи, стремящимся к 0 — см. пунктирную кривую на рис. 11).



Рис. 11: Характерный спектр колебаний напряжённости электрического поля в области распространения пучка (сплошная линия), соответствующий случаю с развитой численной сеточной неустойчивостью в системе без искусственной среды с потерями, а также зависимость передаточной характеристики искусственной среды от частоты электромагнитной волны (пунктирная линия).

Для обработки и анализа выходных данных, получаемых в результате моделирования системы в программном продукте CST Particle Studio, был разработан комплекс специализированных программных модулей (см. рис. 12). В частности, в среде Matlab были созданы алгоритмы для построения и ана-



Рис. 12: Схема программного комплекса, включающего модель в CST Particle Studio и собственные программные коды.

лиза функций распределений заряженных частиц по скоростям и координатам; распределений усреднённых по разным направлениям плотности пространственного заряда и компонент скоростей частиц в системе; полей скоростей и др. Были созданы скрипты для встроенного в CST Particle Studio интерпретатора BASIC для обработки и анализа выходных сигналов (расчёт статистических характеристик, построение Фурье-спектров и др.) и расчёта выходных характеристик (КПД, интегральной и средней мощности и др.) моделей. Впервые предложен и реализован в среде Matlab метод выделения вихревого электрического поля и поля пространственного заряда пучка из суммарного электрического поля, полученного при моделировании электронной системы в среде CST Particle Studio. Данный метод основан на решении уравнения Пуассона для нахождения потенциального электрического поля по известному распределению пространственного заряда в системе. Затем для определения вихревого поля потенциальное поле вычитается из суммарного электрического, полученного в результате моделирования.

С применением программного продукта CST Particle Studio и комплекса разработанных программных модулей были проведены исследования динамики развития и взаимодействия неустойчивостей в РЭП. Обнаружено, что в РЭП со сверхкритическим током начинают развиваться взаимодействующие бурсиановская и диокотронная неустойчивости, при этом выявлено, что развитие бурсиановской способствует диокотронной неустойчивости за счёт существенного повышения плотности пространственного заряда вблизи плоскости инжекции пучка.

В результате взаимодействия неустойчивостей в РЭП, в области ВК по азимуту образуется N вращающихся электронных сгустков (см. рис. 13), при этом при малых внешних магнитных полях они имеют вихревую форму.



Рис. 13: Проекции мгновенных положений заряженных частиц электронного потока (конфигурационные портреты) на поперечное сечение (x, y) при I = 30 кА, B = 0.4 Тл (a, pежим с N = 1 электронным сгустком, положение BK по отношению к плоскости инжекции  $z_{VC} = 1.45$  мм), I = 30 кА, B = 0.6 Тл  $(b, N = 2, z_{VC} = 1.2$  мм), I = 80 кА, B = 1.4 Тл  $(e, N = 6, z_{VC} = 0.48$  мм), I = 75 кА, B = 1.2 Тл  $(e, N = 7, z_{VC} = 0.7$  мм). На конфигурационных портретах показаны только частицы, располагающиеся за плоскостью проекции (с координатой  $z < z_s, z_s = 2$  мм); стрелки показывают области формирующихся в РЭП электронных сгустков; градиентом показана энергия электронов.

Обнаружено, что с ростом тока при различных величинах внешнего магнитного поля наблюдается последовательное увеличение количества N формирующихся в пучке электронных сгустков (см. рис. 13), более чётко проявляющееся в случае относительно сильных внешних магнитных полей B > 1.5 Тл.

Формирование в РЭП электронных сгустков способствует формированию ВК и, как следствие, определяет характерный вид зависимостей  $I_{cr}(B)$  в ре-

лятивистском случае (рис. 14). Так, с увеличением внешнего магнитного поля вначале наблюдается рост величины критического тока (см. начальные участки зависимостей на рис. 14). С дальнейшим увеличением *В* возрастает степень фокусировки пучка, что приводит к уменьшению величины критического тока (см. участки зависимостей на рис. 14 после максимумов).



Рис. 14: Зависимости критического тока трубчатого РЭП от величины индукции внешнего однородного магнитного поля для значений начальной энергии электронов  $W_e$ : кривая 1 - 0.48 МэВ, 2 - 0.6 МэВ, 3 - 0.85 МэВ и 4 - 1.0 МэВ.

При больших внешних магнитных полях (B > 1 Tл) величина критического тока, как и в случае слаборелятивистского потока, уменьшается с ростом B, асимптотически стремясь к постоянному значению. Магнитное поле  $B_{min}$ , при котором критический ток практически выходит на насыщение, определяется следующим аналитическим соотношением, полученным в работе из условия баланса действующих на граничные электроны пучка сил:

$$B_{min} = R_{VC} \sqrt{\frac{\sqrt{2} I \gamma_0^{3/2}}{\pi \varepsilon_0 \eta^{3/2} \sqrt{W_e} (R_{VC}^4 - R_b^4)}},$$
(26)

где  $\eta$  — удельный заряд электрона,  $\gamma_0$  — релятивистский фактор инжектируемого пучка,  $R_{VC}$  – радиус пучка в области ВК, определяемый по результатам численного моделирования,  $W_e$  задаётся в эВ. В этом случае ( $B > B_{min}$ ) ток, при котором в системе формируется ВК, хорошо согласуется с формулой Богданкевич Л.С. и Рухадзе А.А. для критического тока в случае полностью замагниченного электронного потока.

Аналитически и численно показано, что уменьшение толщины трубчатого РЭП приводит к увеличению количества электронных сгустков в азимутальном направлении за счёт увеличения плотности пространственного заряда.



Рис. 15: Зависимости нормированной выходной мощности релятивистского виркатора от индукции внешнего магнитного поля *В* при начальной энергии РЭП 600 кэВ (кривая 1) и 850 кэВ (кривая 2); I = 20 кА.

Проведено исследование поведения мощности выходного СВЧ-излучения

релятивистского виркатора в присутствии внешнего продольного магнитного поля. Получены зависимости выходной мощности от величины внешнего магнитного поля с несколькими локальными максимумами (рис. 15), вид которых обусловлен влиянием внешнего и собственного по отношению к РЭП магнитных полей на процессы формирования ВК в системе.

Показано также, что основная частота выходного излучения релятивистского виркатора скачкообразно возрастает с ростом числа N сгустков в РЭП (рис. 16а). Детально изучены режимы с развитыми высшими гармониками основной частоты осцилляций ВК в подобной системе (рис. 16б).

Выявлено, что увеличение тока электронного потока ведёт к росту амплитуд высших гармоник. Исследовано поведение эффективной плазменной частоты в CBЧ генераторе на основе РЭП со сверхкритическим током при изменении управляющих параметров. Получено аналитическое выражение для характерного тока пучка, хорошо согласующееся с результатами численного моделирования, при котором происходит переключение частоты основной спектральной составляющей с плазменной частоты на удвоенную плазменную частоту. Данные результаты являются важными для разработки модификаций релятивистских виркаторов с существенно более высокой рабочей частотой, что позволит в перспективе продвинуть высокомощные приборы с BK в суб-ТГц диапазон частот.



Рис. 16: (a) Зависимость характерной частоты основной спектральной составляющей осцилляций ВК от количества электронных сгустков N; ( $\delta$ ) спектр токовых осцилляций в системе в режиме с развитыми высшими гармониками, при котором основная спектральная составляющая колебаний ВК равняется удвоенной эффективной плазменной частоте, и вторая гармоника данной частоты (~ 85.3 ГГц) максимальна (I = 28 кА, B = 1.2 Тл).

В пятой главе диссертации приводятся результаты исследований и оптимизации релятивистских генератора и усилителя с интенсивным РЭП в режиме развития неустойчивости Бурсиана и дополнительной обратной связью (моделей виртода-генератора и виртода-усилителя), проведённых с использованием лицензионного программного продукта CST Particle Studio; при этом усилительная схема предложена впервые. Моделирование в CST Particle Studio основано на совместном самосогласованном решении системы уравнений Максвелла и релятивистских уравнений движения в трёх пространственных измерениях с применением метода крупных частиц. Особое внимание в данной главе уделено вопросу создания мощного усилителя на основе электронного потока в режиме развития неустойчивости Бурсиана. Так, подробно описано преобразование известной конструкции виртода-генератора<sup>7</sup> для создания усилителя на базе этого прибора. Принцип работы виртода-усилителя следующий (см. рис. 17). Электронная пушка 1, выполненная в виде цилиндрического вакуумного диода радиуса  $r_g$  со взрывоэмиссионным катодом 4 радиуса  $r_c$  без внешнего фокусирующего магнитного поля, формирует сплошной цилиндрический РЭП с током  $I_0$ , на 5-20% меньшим второго критического  $I_{cr2}$  (при котором в системе начинается генерация), но на 50-80% большим первого критического  $I_{cr1}$  (при котором в системе формируется ВК, и появляются отраженные частицы). Пучок ускоря-



Рис. 17: Оригинальная схема виртода-усилителя. Здесь 1 – электронная пушка, 2 – первый резонатор, 3 – второй резонатор, 4 – взрывоэмиссионный катод, 5 – анодная сетка, 6 – генератор напряжения, 7 – алюминиевая фольга, 8 – элемент ввода сигнала в виде коаксиального волновода, 9 – вывод мощности в виде волновода.

ется в зазоре между катодом 4 и анодной сеткой 5 за счёт действия разности потенциалов, формируемой генератором напряжения 6. Далее сформированный электронный поток транспортируется через анодную сетку 5 в первый резонатор 2 длиной  $L_1$  и высотой  $h_1$ , а затем — во второй резонатор 3 длиной  $L_2$  и высотой  $h_2$  в направлении, перпендикулярном к их наибольшей стенке. Резонаторы электромагнитно не связаны и имеют общую стенку с фольгой 7, через которую поток пролетает из первого резонатора 2 во второй резонатор 3. В левой части первого резонатора 2 расположен элемент ввода сигнала 8 в виде коаксиального волновода с внутренним проводником 9, через который в систему подается усиливаемый СВЧ сигнал. Длина  $L_1$  первого резонатора выбиралась из условия, чтобы в нём укладывалось 3 полуволны на рабочей частоте. В первом резонаторе происходит взаимодействие РЭП с модой резонатора, которая возбуждается входным сигналом. В результате, пучок попадает во второй резонатор, будучи промодулированным по плотности, при этом частота следования сгустков определяется частотой входного сигнала.

 $<sup>^7 \</sup>rm Shlapakovski A.S. et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 40 (6) (2012) 1607-1617; Kitsanov S. A. et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 30 (1) (2002) 274.$ 

Это приводит к установлению в системе режима с развитым нестационарным ВК во втором резонаторе и возбуждению в нём усиленного электромагнитного поля, которое выводится через вывод мощности 10 во второй секции. Таким образом, на выходе системы появляется усиленный входной сигнал.

Анализ релятивистского виртода-усилителя проводился применительно к схеме, изображённой на рис. 17. При разработке конструкции усилителя на



Рис. 18: Зависимости коэффициента усиления виртода-усилителя по мощности K (a) от частоты внешнего сигнала  $f_{in}$  при амплитуде входного сигнала  $0.5 \,\mathrm{kB}$  (мощности –  $0.25 \,\mathrm{MBT}$ ) и ( $\delta$ ) от амплитуды входного сигнала  $A_{in}$  при  $f_{in} = 1.14 \,\Gamma\Gamma\mu$ . Точками на ( $\delta$ ) показаны данные, полученные в численном эксперименте, а кривой — их аппроксимация, пунктирная линия — асимптота.

ВК была проведена оптимизация геометрии прибора и параметров пучка с использованием разработанной математической модели и численного моделирования с целью достижения максимального коэффициента усиления входного сигнала. На рисунке 18 приведены зависимости коэффициента усиления виртода-усилителя по мощности от частоты и амплитуды входного сигнала. Частотная зависимость (рис. 18а) имеет два характерных пика, определяемых модами модулирующего резонатора, и показывает, что рассматриваемый усилитель является узкополосным, при этом ширина полосы частот усиливаемого сигнала составляет  $\sim 0.6\%$ . Наиболее эффективно усиливается внешний сигнал среднего уровня мощности (порядка  $0.25 \div 1 \, \mathrm{MBT}$ , амплитуда  $0.5 \div 1 \, \mathrm{KB}$ ) с максимальным коэффициентом усиления порядка 18 дБ (рис. 18б). Также были проведены исследования, показывающие возможность перестройки рабочей частоты усилителя за счёт изменения геометрии входного модулирующего резонатора.

Таким образом, в работе предложена, исследована и оптимизирована с применением математического моделирования новая схема усилителя мощных СВЧ сигналов, основанная на использовании РЭП в режиме развития неустойчивости Бурсиана — виртод-усилитель.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные при выполнении данной диссертационной работы:

1. Разработаны одномерная и 2.5-мерная самосогласованные математические модели, основанные на методе крупных частиц, и их эффективные программные реализации в виде комплекса программ для анализа с применением современных компьютерных технологий динамики интенсивных нерелятивистских и слаборелятивистских электронных потоков при развитии в них неустойчивостей и процессов генерации в подобных системах.

2. Разработана стационарная одномерная аналитическая модель электронного потока с ВК под воздействием внешнего сигнала, приводящего к скоростной модуляции пучка, отличающаяся учётом влияния внешнего сигнала вместе с дополнительным торможением.

3. В ходе математического моделирования в рамках разработанных одномерных численной и аналитической моделей исследованы механизмы и закономерности развития неустойчивости Бурсиана в электронном потоке в автономном низковольтном виркаторе и её взаимодействия с кинематической неустойчивостью в неавтономной системе, а также влияние обнаруженных эффектов на характеристики генерации.

4. С помощью математического моделирования в рамках разработанной 2.5-мерной математической модели проведён анализ влияния различных параметров системы, в особенности внешнего магнитного поля, на условия (критические токи) и механизмы развития в слаборелятивистском электронном потоке неустойчивости Бурсиана, приводящей к образованию BK, а также на динамику подобной системы.

5. Впервые введено понятие эффективной плазменной частоты и исследовано её поведение при изменении управляющих параметров системы с интенсивным электронным потоком.

6. Разработана модификация 2.5-мерной самосогласованной модели, позволяющая задавать внешние неоднородные магнитные поля, начальный шумовой разброс электронов по скоростям и углам влёта, а также модуляцию эмиссии электронного потока в системе со слаборелятивистским пучком с ВК.

7. В ходе математического моделирования изучено влияние параметров модуляции эмиссии пучка и начального шумового разброса электронов по скоростям и углам влёта на динамику интенсивного слаборелятивистского электронного потока в режиме развития неустойчивости Бурсиана и выходные характеристики генерации в подобной системе.

8. Проведены исследования условий, механизмов и динамики развития и взаимодействия неустойчивостей в интенсивных релятивистских и ультрарелятивистских электронных потоках со сверхкритическими токами, а также выходных характеристик (мощности генерации, спектрального состава и др.) релятивистского виркатора с использованием лицензионного программного продукта для трёхмерного электромагнитного PIC-моделирования CST Particle Studio и комплекса разработанных программных модулей для обработки данных моделирования. Разработан эффективный метод подавления численных неустойчивостей при моделировании релятивистских систем в CST Particle Studio, основанный на введении искусственной среды с потерями.

9. С использованием лицензионного программного продукта CST Particle Studio и комплекса разработанных программных модулей для обработки данных моделирования проанализированы условия, механизмы и динамика развития и взаимодействия неустойчивостей в РЭП со сверхкритическим током, а также выходные характеристики генерации релятивистского виркатора; разработан эффективный метод подавления численных неустойчивостей в подобных системах.

10. Обнаружено, что взаимодействие неустойчивости Бурсиана и диокотронной неустойчивости приводит к формированию неоднородного в азимутальном направлении виртуального катода в виде N вращающихся электронных сгустков, при этом количество сгустков возрастает с ростом тока пучка. Формирование в РЭП электронных сгустков в азимутальном направлении существенно влияет на условия образования ВК в системе и характеристики излучения в СВЧ-генераторе на основе РЭП со сверхкритическим током.

11. С использованием лицензионного программного продукта CST Particle Studio и комплекса разработанных программных модулей для обработки данных моделирования проведено трёхмерное численное моделирование виртодагенератора с целью анализа его характеристик и происходящих в нём процессов при развитии в электронном потоке неустойчивостей. Выявлен один из механизмов, приводящих к ограничению импульса выходного CBЧ-излучения в виртоде-генераторе, связанный с переключением моды колебаний электромагнитного поля в одной из секций виртода.

12. Предложена новая схема усилителя СВЧ-сигналов высокой мощности (виртода-усилителя), основанная на схеме релятивистского виртода-генератора. С помощью разработанной модели в CST Particle Studio проведено трёхмерное численное моделирование предложенной схемы усилителя и получены зависимости выходных характеристик виртода-усилителя от параметров входного сигнала и перестройки геометрических параметров прибора.

#### Основные публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК  $P\Phi$ , входящие в базы цитирования Web of Science и Scopus

1. Бадарин А.А., Куркин С.А., Короновский А.А., Рак А.О., Храмов А.Е. Моделирование процессов развития и взаимодействия неустойчивостей в релятивистском электронном потоке при изменении толщины пучка. Физика плазмы. 43, 3 (2017) 284-292.

2. Петрик А.Г., Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Трехмерное моделирование формирования сжатого состояния электронного пучка в составной трубе дрейфа и анализ его характеристик. Письма в ЖТФ. 42, 15 (2016) 43-50.

3. Frolov N.S., Kurkin S.A., Khramova M.V. et al. Perspective sub-THz powerful microwave generator "nanovircator" for T-rays biomedical diagnostics. Proc. SPIE. 9917, (2016) 991721.

4. Dubinov A.E., Petrik A.G., Kurkin S.A., Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Beam-plasma instability in charged plasma in the absence of ions. Physics of Plasmas. 23,

(2016) 042105.

5. Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. The development and interaction of instabilities in intense relativistic electron beams. Physics of Plasmas. 22, (2015) 122110.

6. Бадарин А.А., Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Исследование влияния проводимости стенок камеры дрейфа на динамику релятивистского электронного потока с виртуальным катодом. Письма в ЖТФ. 41, 23 (2015) 72-80.

7. Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Effect of the electron beam modulation on the sub-THz generation in the vircator with the field-emission cathode. J. Plasma Physics. 81, (2015) 905810320.

8. Kurkin S.A., Frolov N.S., Rak A.O., Koronovskii A.A., Kuraev A.A., Hramov A.E. Highpower microwave amplifier based on overcritical relativistic electron beam without external magnetic field. Applied Physics Letters. 106, (2015) 153503.

9. Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Higher harmonics generation in relativistic electron beam with virtual cathode. Physics of Plasmas. 21, 9 (2014) 093105.

10. Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Kalinin Ju.A., Kurkin S.A., Starodubov A.V., Hramov A.E. The effect of an external signal on output microwave power of a low-voltage vircator. Phys. Lett. A. 378, 32-33 (2014) 2423–2428.

11. Егоров Е.Н., Короновский А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. Формирование и нелинейная динамика сжатого состояния винтового электронного пучка с дополнительным торможением. Физика плазмы. 39, 11 (2013) 1033-1044.

12. Kurkin S.A., Hramov A.E., Koronovskii A.A. Microwave radiation power of relativistic electron beam with virtual cathode in the external magnetic field. Applied Physics Letters. 103, (2013) 0435071-5.

13. Егоров Е.Н., Короновский А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. Возникновение сжатых состояний винтового электронного потока в системе с торможением. Письма в ЖТФ. 39, 19 (2013) 67-75.

14. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Кураев А.А., Колосов С.В. Оптимизация параметров генератора на виртуальном катоде с неоднородным магнитным полем. ЖТФ. 83, 10 (2013) 98-107.

15. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Особенности формирования и динамики виртуального катода с учетом собственных магнитных полей релятивистского электронного потока. Физика плазмы. 39, 4 (2013) 333-344.

16. Hramov A.E., Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Filatova A.E. Effect of self-magnetic fields on the nonlinear dynamics of relativistic electron beam with virtual cathode. Physics of Plasmas. 19, 11 (2012) 2101-1-7.

17. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A., Rempen I.S. Chaotic oscillations in electron beam with virtual cathode in external magnetic field. Int. J. Electronics. 98, 11 (2011) 1549–1564.

18. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Мощность выходного СВЧ-излучения низковольтного генератора на виртуальном катоде с внешним неоднородным магнитным полем. Письма в ЖТФ. 37, 8 (2011) 26-33.

19. Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. 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.

20. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A. 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.

21. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Нелинейная динамика электронного потока с виртуальным катодом во внешнем неоднородном магнитном поле. Письма в ЖТФ. 36, 11 (2010) 69-76. 22. Куркин С.А. Влияние шумового разброса электронов по скоростям на динамику электронного потока с виртуальным катодом. Радиотехника и электроника. 55, 4 (2010) 1-9.

23. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Нелинейная динамика и хаотизация колебаний в трубчатом электронном потоке во внешнем однородном магнитном поле. Физика плазмы. 35, 8 (2009) 684-699.

24. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Формирование и динамика виртуального катода в трубчатом электронном пучке во внешнем магнитном поле. ЖТФ. 79, 10 (2009) 119-128.

25. Куркин С.А., Храмов А.Е. Формирование виртуального катода в трубчатом электронном потоке во внешнем магнитном поле. Письма в ЖТФ. 35, 1 (2009) 48-54.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, входящие в базу цитирования Scopus

26. Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. Мультистабильность в релятивистском электронном потоке со сверхкритическим током. Изв. РАН. Сер. физическая. 79, 12 (2015) 1646–1649.

27. 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.. Изв. РАН. Сер. физическая. 78, 12 (2014) 1604-1607.

28. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Мощность СВЧ-генерации ультрарелятивистского электронного потока в режиме формирования виртуального катода во внешнем магнитном поле. Изв. РАН. Сер. физическая. 77, 12 (2013) 1756-1760.

29. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Кураев А.А., Колосов С.В. Нелинейная динамика генератора на виртуальном катоде с модуляцией эмисии. Изв. РАН. Сер. физическая. 77, 12 (2013) 1761-1764.

30. Филатов Р.А., Короновский А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. Динамика электронного потока с виртуальным катодом в виркаторе без магнитного поля с пространством дрейфа, заполненным нейтральным газом. Изв. РАН. Сер. физическая. 76, 12 (2012) 1492-1494.

31. Куркин С.А., Храмов А.Е. Влияние внешнего неоднородного магнитного поля на спектральные характеристики выходного излучения генератора с виртуальным катодом. Изв. РАН. Сер. физическая. 75, 12 (2011) 1716-1719.

32. Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н., Короновский А.А., Филатов Р.А. Программный пакет для исследования и оптимизации нелинейных нестационарных процессов в микроволновых генераторах с электронной обратной связью. Математическое моделирование. 23, 1 (2011) 3-18.

33. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Хаотизация колебаний виртуального катода во внешнем магнитном поле, создаваемом кольцевым магнитом. Изв. РАН. Сер. физическая. 73, 12 (2009) 1736-1738.

Публикации в центральных изданиях, включённых в перечень периодических изданий ВАК РФ

34. Куркин С.А., Бадарин А.А., Короновский А.А., Рак А.О., Храмов А.Е. Генерация высших гармоник в релятивистском электронном потоке с виртуальным катодом. Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 23, 1 (2015) 41-52.

35. 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. 11, 4 (2012) 489-497.

36. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Исследование влияния релятивистского фактора электронного потока на условия формирования и нелинейную динамику виртуального катода. Вестник ТГУ. 16, 2 (2011) 549-553.

37. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатова А.Е., Магда И.И., Мележик О.Г. Трехмерное численное моделирование виртода с тороидальными резонаторами. Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 20, 5 (2012) 121-136.

38. Куркин С.А., Короновский А.А., Егоров Е.Н., Лёвин Ю.И., Филатов Р.А., Храмов А.Е. Математическая модель и ее численная реализация для исследования и оптимизации генераторов с электронной обратной связью. Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 18, 6 (2010) 106-137.

39. Куркин С.А., Короновский А.А., Лёвин Ю.И., Храмов А.Е. Широкополосная хаотическая генерация и оптимизация её характеристик в СВЧ генераторе с электронной обратной связью и магнитной периодической фокусирующей системой. Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 18, 3 (2010) 104-127.

40. Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. 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.

41. Калинин Ю.А., Куркин С.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. СВЧ-генераторы хаотических колебаний на основе электронных пучков с виртуальным катодом. Успехи современной радиоэлектроники. 9 (2008) 53-55.

42. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Влияние внешнего магнитного поля на формирование и динамику виртуального катода. Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 16, 4 (2008) 182-201.

Главы в монографиях

43. Калинин Ю.А., Куркин С.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. 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. – 216 с. Сс. 82-86.

44. Егоров Е.Н., Куркин С.А., Храмов А.Е. 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. – 392 с. – ISBN 978-5-9221-1084-6. Сс. 126-172.

45. Бадарин А.А., Короновский А.А. Куркин С.А. и др. Мощные пучково-плазменные системы с виртуальным катодом и перспективы их продвижения в суб-ТГц и ТГц диапазоны / Глава в монографии «Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона» / Под ред. А.Е. Храмова, А.Г. Баланова, В.Д. Еремки, В.Е. Запевалова, А.А. Короновского. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2016. 460 с. ISBN: 978-5-7433-3013-3.

#### Патенты

46. Храмов А.Е., Куркин С.А., Москаленко О.И., Фролов Н.С., Короновский А.А. Усилитель мощных СВЧ сигналов. Патент на изобретение № 2608544 , 2017.

47. Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. Управляемый генератор на виртуальном катоде. Патент на изобретение № 2444081, 2012.

48. Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. Генератор на виртуальном катоде. Патент на изобретение № 2431902, 2011.

49. Храмов А.Е., Филатов Р.А., Короновский А.А., Куркин С.А. Генератор хаотических радиоимпульсов на виртуальном катоде. Патент на изобретение № 2431901, 2011.

50. Куркин С.А., Калинин Ю.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. Генератор широкополосного шумоподобного сигнала. Патент на изобретение № 2390871, 2010.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

51. Петрик А.Г., Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. Программа для получения и анализа распределений заряженных частиц по скоростям на основе данных моделирования пучково-плазменной системы в среде CST Particle Studio. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619620, 2016.

52. Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. Программа для анализа и визуализации динамики электронного потока по данным, полученным в среде CST Particle Studio. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619117, 2016.

53. Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ по визуализации состояний релятивистского электронного потока при 3D моделировании (3DBeamVis). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614534, 2016.

54. Петрик А.Г., Храмов А.Е., Куркин С.А., Короновский А.А. Программа для обработки данных PIC-моделирования сжатого состояния в пучковой системе. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614533, 2016.

55. Фролов Н.С., Куркин С.А., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ по преобразованию массива данных и расчету характеристик нестационарной динамики ансамблей заряженных частиц (Charged Particles Ensemble Analysis). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614531, 2016.

56. Куркин С.А., Бадарин А.А., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ по расчету характеристик генерации релятивистского вакуумного генератора, моделируемого с использованием трехмерного PIC кода (Relativistic Generator Characteristics Calc). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614530, 2016.

57. Куркин С.А., Фролов Н.С. Программа для анализа электронного потока. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611255, 2016.

58. Куркин С.А., Рак А.О., Храмов А.Е., Короновский А.А. Программа для анализа сигналов СВЧ устройств. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662441, 2015.

59. Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. 2.5D код для моделирования процессов электронных потоков с модуляцией эмиссии с учетом пространственного заряда и внешнего магнитного поля (2.5D Simulation of Electron Beam with Emisson Modulation). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611059, 2015.

60. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. Программа для ЭВМ - электромагнитный код для численного моделирования процессов в релятивистском генераторе с электронной обратной связью во внешних магнитных полях произвольных конфигураций (Vircator with External Magnetic Field). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610496, 2014.

61. Куркин С.А., Филатов Р.А., Храмов А.Е. Программа для моделирования нестационарных нелинейных процессов в релятивистских пучках заряженных частиц с виртуальным катодом в присутствии ионизации газа, заполняющего рабочую камеру виркатора. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013611206, 2013.

62. Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. Программа двумерного моделирования слаборелятивистских электронных потоков с учетом пространственного заряда во внешнем магнитном поле. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009611873, 2009.

Подписано в печать 21.03.17		$\Phi$ ормат 60х84 1/16
Бум. офсет.	Усл. печ. л. 2.0	Учизд. л. 2.0
Тираж 100 экз.	Заказ 13	Бесплатно
Саратовский государственный	технический университет	
410054, Саратов, Политех	кническая ул., 77	
Отпечатано в Издательстве СГ	ТУ. 410054, Саратов, Полит	ехническая ул., 77
Тел.: 24-95-70; 99-87-39, е	-mail: izdat@sstu.ru	