

ФГБОУ ВПО “Саратовский государственный университет имени  
Н.Г. Чернышевского”

*На правах рукописи*

ФРОЛОВ Никита Сергеевич

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

01.04.03 – Радиофизика

01.04.04 – Физическая электроника

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико–математических наук

Научные руководители

д.ф.–м.н., профессор

Храмов А.Е.

к.ф.–м.н., доцент

Куркин С.А.

Саратов — 2015

# Оглавление

Введение	5
<b>1 Генератор на виртуальном катоде с предварительной модуляцией электронного потока (одномерное рассмотрение)</b>	<b>26</b>
1.1 Введение . . . . .	26
1.2 Внешнее гармоническое воздействие на пучок в тормозящем поле	30
1.2.1 Теоретическая модель . . . . .	30
1.2.2 Численная модель . . . . .	36
1.2.3 Численный анализ процессов в неавтономном генераторе на виртуальном катоде . . . . .	47
1.3 Связанные генераторы на виртуальном катоде . . . . .	59
1.3.1 Цепочка генераторов на ВК . . . . .	60
1.3.2 Хаотическая синхронизация генераторов на виртуальном катоде . . . . .	66
1.3.2.1 Синхронизация временных масштабов . . . . .	66
1.3.2.2 Обобщенная синхронизация . . . . .	72
1.3.2.3 Способ скрытой передачи данных на основе установления обобщенной синхронизации с использованием низковольтных виркаторов . . . . .	76
1.4 Выводы . . . . .	78

<b>2</b>	<b>Анализ процессов в неавтономном генераторе на виртуальном катоде в рамках трехмерного моделирования. Сравнение с экспериментом</b>	<b>80</b>
2.1	Введение . . . . .	80
2.2	Трехмерная полностью электромагнитная модель автономного низковольтного виркатора . . . . .	83
2.2.1	Трехмерное моделирование конструкции и оптимизация геометрических параметров генератора на виртуальном катоде . . . . .	83
2.2.2	Моделирование динамики пучка с виртуальным катодом в автономном режиме . . . . .	92
2.3	Ввод внешнего сигнала . . . . .	96
2.3.1	Результаты численного моделирования . . . . .	97
2.3.2	Сравнение с результатами эксперимента . . . . .	102
2.4	Выводы . . . . .	105
<b>3</b>	<b>Усиление сигнала в виркаторной системе, содержащей релятивистский электронный поток</b>	<b>107</b>
3.1	Введение . . . . .	107
3.2	Базовая модель – релятивистский двухзазорный виркатор с электромагнитной обратной связью . . . . .	109
3.2.1	Генератор импульсов СВЧ излучения высокого уровня мощности – релятивистский виртод . . . . .	109
3.2.2	Трехмерное численное моделирование релятивистского виртода в среде CST Particle Studio . . . . .	117
3.3	Усилитель СВЧ сигнала, основанный на релятивистском двухзазорном виртоде . . . . .	126

3.3.1	Преобразование конструкции релятивистского виртода для ввода внешнего сигнала . . . . .	127
3.3.2	Результаты численного моделирования процессов усиления в виркаторной системе на основе релятивистского виртода . . . . .	131
3.4	Выводы . . . . .	137
<b>Заключение</b>		<b>139</b>



# Введение

**Актуальность исследуемой проблемы.** Изучение нестационарных колебательных и волновых процессов в электронных системах, в которых потоки заряженных частиц взаимодействуют с электромагнитными полями, продолжает оставаться важной фундаментальной задачей современной радиофизики и физической электроники, поскольку она тесно связана с проблемами оптимизации характеристик существующих и разработки новых приборов и устройств вакуумной и плазменной электроники СВЧ и ТГц диапазонов [1–9]. Проводимые в данном направлении исследования имеют большую значимость с точки зрения выявления общих закономерностей в динамике интенсивных электронных пучков, взаимодействующих с высокочастотными полями электродинамических систем, а также анализа физических процессов в распределенных активных средах пучково-плазменной природы [10–13]. Не менее важной современной задачей является проблема управления сложным поведением распределенных автоколебательных систем, демонстрирующих сложные колебательные режимы [13–17]. Основной прогресс в этом направлении достигнут при исследовании систем с малым числом степеней свободы (осцилляторов с конечномерным фазовым пространством), однако, в настоящее время интерес исследователей смещается к изучению методов управления распределенными автоколебательными системами, особенно при установлении в них пространственно-временной хаотической динамики [18]. В связи с этим особый интерес вызывает изучение распределенных активных

сред физики плазмы и СВЧ электроники, поскольку подобные активные среды являются классическими примерами распределенных нелинейных активных сред со сложной пространственно-временной динамикой [5, 12, 13, 19, 20]. Интерес к ним связан как с высокой значимостью подобных систем для современной вакуумной и плазменной электроники больших мощностей, так и тем, что для них хорошо развиты методы экспериментального исследования, что делает подобные системы удобным объектом для проверки различных методов и подходов к управлению сложной пространственно-временной динамикой, развиваемых в радиофизике и нелинейной динамике [13, 21].

Одним из важных и интересных объектов исследований в данном контексте изучения сложной нелинейной динамики пучково-плазменных активных сред является исследование физических процессов в приборах с виртуальным катодом (так называемых виркаторах), в которых под влиянием полей пространственного заряда (собственных высокочастотных полей) электронных пучков со сверхкритическим током в пространстве дрейфа образуется минимум потенциала — виртуальный катод, который при превышении током пучка некоторого критического значения начинает совершать колебания во времени и пространстве [2, 5, 22–29]. Характерными особенностями устройств сверхвысокочастотной электроники, использующих колебания виртуального катода для генерации мощного СВЧ излучения, являются сложная пространственно-временная динамика турбулентного электронного пучка и высокий уровень шумового пьедестала в спектре выходного сигнала [20, 30–43].

Важно отметить, что сложная хаотическая динамика в приборах СВЧ электроники являлась объектом активных исследований во всем мире ещё во второй половине двадцатого века. Особое внимание уделялось таким СВЧ приборам как лампа бегущей волны с запаздыванием, лампа обратной волны

О и М-типа, различным гироприборам, лазерам на свободных электронах и генераторам на основе электронных пучков со сверхкритическим током (виркаторам) [5, 7, 8, 13, 21]. Среди указанного ряда устройств генераторы на виртуальном катоде (отражательные триоды, виркаторы, виртоды, редитроны) характеризуются простотой конструкции, возможностью работы без внешних магнитных полей, широким диапазоном частот, высокой мощностью выходного СВЧ излучения [5, 8, 20, 29, 37, 44–49]. Изучение динамики интенсивных электронных потоков в виркаторных системах и исследования, направленные на оптимизацию характеристик данных устройств, проводятся как в России (А.Н. Диденко (МИФИ), А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир (Российский федеральный ядерный центр, Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики), Д.И. Трубецков, Ю.А. Калинин (СГУ), А.Г. Жерлицин, В.П. Григорьев (ТПУ), А.П. Привезенцев (ЧГУ), И.В. Пегель, С.А. Кицанов (Институт сильноточной электроники СО РАН) и др.), так и во многих крупных зарубежных исследовательских центрах (И.И. Магда, Н.Н. Гадецкий (Харьковский физико-технический, Харьков, Украина), В.Г. Барышевский, В.В. Тихомиров (Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета), А. Shlapakovski, Ya. Krasik, Yu. Bliokh (Technion, Haifa, Israel), J. Benford (Microwave systems Inc., Lafayette, USA), К. Masugata, К. Yatsui (Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Japan) и др.). Проведенные как теоретические [19, 33, 36, 49–58], так и экспериментальные исследования [8, 29, 37, 40, 47, 48, 59–64] свидетельствуют о том, что виркаторы можно рассматривать как перспективные источники широкополосного излучения высокой мощности с возможностью их применения для различных прикладных задач, таких как радиолокация и радиопротиводействие, нагрев плазмы, зондирование атмосферы, технологические процессы и др. [5, 29, 45, 48, 65–70].

Исследования влияния внешней и внутренней обратной связи на характеристики генерации виркаторных систем (схема с дополнительной обратной связью получила название “виртод”) положили начало изучению неавтономной динамики генераторов на виртуальном катоде и исследованию вопроса об управлении характеристиками выходного сигнала за счет внешнего воздействия. В частности, в работе [37] показана высокая чувствительность характеристик выходного излучения этих устройств к параметрам обратной связи. Численное и теоретическое исследования виртода выявили многие физические аспекты взаимодействия интенсивного электронного потока и сигнала в цепи внешней обратной связи, а также механизмы формирования виртуального катода в такой виркаторной системе [32, 34, 71–73]. Проведенные работы по изучению влияния внешнего сигнала на динамику виртуального катода, носившие чисто экспериментальный характер [74], остановились лишь на констатации факта синхронизации колебаний выходного СВЧ излучения и внешнего сигнала. Теоретическое и экспериментальное исследование неавтономной динамики генератора на виртуальном катоде [75] ограничилось рассмотрением влияния гармонического сигнала. Слабо изучен вопрос о влиянии внешнего сигнала на мощность выходного излучения виркатора. На сегодняшний момент при изучении сложной динамики неавтономных виркаторных систем вызывает значительный интерес задача анализа цепочек связанных мощных СВЧ генераторов в связи с развитием теории нелинейных антенн и изучения вопросов сложения мощностей от нескольких источников для получения сверхбольших уровней мощности выходного излучения [76, 77]. Последнее важно в целом ряде фундаментальных и прикладных задач физики плазмы, обработки материалов, нанотехнологий, дистанционного зондирования атмосферы и т.д.

Помимо этого важной задачей, лежащей в русле изучения и практического применения эффектов нелинейного взаимодействия связанных низковольтных виркаторных систем, является анализ установления синхронизации между взаимодействующими осцилляторами на виртуальном катоде и использования этих колебательных систем в качестве активных модулей в схемах для скрытой передачи данных, основанных на установлении хаотической синхронизации между передающим и принимающим устройствами [78]. В работах [79–82] было показано, что такие схемы для секретной передачи информации обладают рядом существенных достоинств, таких как высокая устойчивость к шумам в канале связи и высокая степень конфиденциальности передачи данных. Низковольтные генераторы на виртуальном катоде в режиме широкополосной генерации могут быть рассмотрены как перспективные модули для проектирования приемо-передающих устройств в подобных системах скрытой передачи информации.

Следует также отметить, что вопрос об увеличении выходной мощности неавтономных виркаторных систем за счет подачи слабого внешнего сигнала, остается открытым и малоизученным. В работе [83] была экспериментально показана возможность повышения мощности выходного излучения генератора на виртуальном катоде под внешним воздействием. При этом существует необходимость детального теоретического исследования данного эффекта и выявления физических механизмов, приводящих к значительному повышению мощности электромагнитного излучения виркатора. Кроме того, в современной СВЧ электронике больших мощностей существует потребность в создании усилителей мощного микроволнового излучения. Понимание физических процессов, протекающих в интенсивном электронном пучке в режиме формирования виртуального катода под воздействием внешнего сигнала, может способствовать созданию таких усилителей на основе

виркаторных систем, где электронный поток выступает в качестве активной среды для усиления внешнего сигнала.

Обозначенные актуальные проблемы современной СВЧ электроники и радиофизики подтверждают необходимость систематического изучения влияния внешнего сигнала на поведение интенсивных электронных потоков с виртуальным катодом и управления его динамикой за счет внешнего воздействия, поскольку проводимые в данном направлении исследования способствуют не только продвижению в понимании фундаментальных нелинейных процессов в пучках заряженных частиц, в частности, синхронизации колебаний виртуального катода внешними сигналами (проблема радиофизики), но и решению ряда практических задач, включая создание эффективных методов повышения выходной мощности генерации виркаторов и разработку усилителей сверхмощного СВЧ излучения на основе пучка с виртуальным катодом (проблема физической электроники).

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

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

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

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

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

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

4. Исследован процесс установления синхронной динамики однонаправленно связанных виркаторных систем посредством анализа обобщенной синхронизации и синхронизации временных масштабов. Для диагностики обобщенной синхронизации применялись подходы, которые показали высокую эффективность при анализе синхронного поведения связанных систем, такие, как метод вспомогательной системы и расчет спектра показателей Ляпунова. При изучении вопроса об установлении синхронизации временных масштабов был использован математический аппарат непрерывного вейвлетного преобразования выходных сигналов взаимодействующих систем.

5. В рамках программного комплекса CST Particle Studio построена полностью электромагнитная трехмерная численная модель неавтономного нерелятивистского генератора на виртуальном катоде; проведена оптимиза-

ция геометрических параметров пушечной части, резонатора, а также электродинамических систем для ввода и вывода СВЧ сигнала для достижения наилучшего взаимодействия пучка с электромагнитными полями электродинамических структур.

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

7. Предложена конструкция нового высокомоощного виркатора-усилителя, основанная на схеме релятивистского двухзазорного виртода. Проведена математическая оптимизация параметров усилительной системы (как геометрических параметров резонаторной и волноведущей систем, так и параметров пучка) для достижения максимальной эффективности усиления внешнего сигнала.

8. Проведено подробное изучение процессов усиления сигнала в предложенной релятивистской модели виркатора-усилителя. Особое внимание уделялось анализу выходных характеристик в зависимости от параметров входного сигнала и изучению вопроса о возможности управления выходными характеристиками за счет механической перестройки геометрии прибора.

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



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

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

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

- Впервые проведено моделирование физических процессов в нерелятивистском пучке со сверхкритическим током в неавтономном низковольтном виркаторе в рамках трехмерной полностью электромагнитной модели с помощью программного комплекса CST Particle Studio, а также матема-

тическая оптимизация геометрии прибора и волноведущих структур. При анализе данной нерелятивистской виркаторной системы также было получено увеличение мощности выходного сигнала при подаче слабого внешнего гармонического воздействия, как было показано ранее в рамках одномерного моделирования пучка. Результаты полученные при помощи трехмерного численного моделирования в CST Particle Studio находятся в хорошем качественном и количественном согласии с результатами работ на экспериментальной установке, полученными в научной группе под руководством Ю.А. Калинина.

- С помощью программного комплекса CST Particle Studio проведено численное исследование поведения пучка в двухсекционном релятивистском виртоде. Выявлен один из механизмов, ответственных за ограничение импульса выходного СВЧ излучения. Проведено сравнение полученных в ходе численного моделирования результатов с известными экспериментальными работами, проведенными научными группами под руководством С.Д. Коровина и Я. Краси́ка. Получено хорошее согласие численных расчетов и экспериментальных данных.

- Впервые предложена модель двухсекционного виркатора-усилителя высоких мощностей. Разработанная и детально исследованная в рамках данной диссертационной работы усилительная схема основана на схеме известного релятивистского двухззорного виртода. Выявлены основные закономерности работы предложенного усилителя на основе релятивистского электронного пучка с виртуальным катодом, а также показаны зависимости выходных характеристик виркатора-усилителя от параметров входного сигнала и перестройки геометрических параметров прибора.

**Личный вклад.** Основные результаты диссертации получены лично автором. В большинстве совместных работ автором выполнены все численные

и аналитические расчеты. Постановка задач, разработка методов их решения, объяснение и интерпретация результатов были осуществлены совместно с научным руководителем и другими соавторами научных работ, опубликованных соискателем.

**Научная и практическая значимость** диссертационной работы состоит в том, что результаты, полученные в рамках проведенных исследований могут быть использованы для решения задач, связанных с созданием новых и оптимизацией уже существующих СВЧ приборов, содержащих электронные пучки со сверхкритическим током, для генерации и усиления импульсов мощного электромагнитного СВЧ излучения. Помимо этого полученные результаты могут найти применение при создании элементной базы приемопередающих устройств на основе СВЧ приборов с виртуальным катодом в сфере телекоммуникации и фазированных антенных решеток в радиолокационных схемах. Проведенный анализ физических процессов в электронных пучках, приводящих к улучшению группировки частиц в области образования виртуального катода за счет воздействия слабым внешним сигналом, позволяет дать рекомендации специалистам, занимающимся проектированием и разработкой устройств с виртуальным катодом, включая системы ускорения ионных потоков, по достижению оптимальных параметров подобных приборов.

В частности, одной из основных решаемых в рамках настоящей диссертационной работы задач является изучение физических механизмов, приводящих к росту выходной мощности систем с виртуальным катодом, находящихся под воздействием внешнего сигнала. Анализ оптимальных условий формирования виртуального катода в пучке под внешним воздействием позволит существенно увеличить выходную мощность рассматриваемых приборов, а также решить актуальную для виркаторных систем задачу по-

вышения КПД. Кроме прикладного значения полученные результаты имеют также фундаментальную значимость, поскольку внешнее воздействие можно рассматривать как способ управления сложной нелинейной динамикой активной автоколебательной среды, который влияет на процессы образования и взаимодействия структур.

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

Исследование процессов и характеристик генерации мощного электромагнитного излучения, а также механизмов ограничения длительности СВЧ импульсов в схеме двухзазорного виртода могут быть полезны при проектировании и оптимизации характеристик такого перспективного класса виркаторных систем как виртоды, которые характеризуются высокой мощностью, близкой к одночастотной генерацией, низким уровнем шумов, возможностью работы без магнитных полей, относительно высоким КПД.

Рассмотрение релятивистского электронного пучка с током пучка, лежащим между первым и вторым критическими токами, как активной среды для усиления внешнего сигнала открывает перспективы для создания высокомоощных усилителей на основе приборов с виртуальным катодом. Создание подобных устройств является актуальной задачей современной СВЧ электроники больших мощностей.

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

### **Основные результаты и выводы**

1. В рамках одномерной *particle-in-cell* модели электронного пучка с виртуальным катодом под воздействием внешнего гармонического сигнала, а также стационарной аналитической модели неавтономного пучка, было показано существенное увеличение мощности колебаний виртуального катода, связанное с улучшением группировки электронного потока в области образования виртуального потока за счет предварительной скоростной модуляции частиц. Стоит заметить, что аналогичный эффект роста мощности выходного излучения был получен при рассмотрении цепочки однонаправленно связанных генераторов на виртуальном катоде при близкой настройке управляющих параметров ведущего и ведомого генераторов.

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

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

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

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

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

1. В рамках теоретического анализа и численного моделирования показано, что скоростная модуляция пучка на входе в рабочую камеру низко-

вольтного виркатора внешним сигналом с частотой, близкой к частоте колебаний виртуального катода, позволяет максимально увеличить мощность выходного СВЧ излучения виркатора в  $4 \div 7$  раз за счет улучшения группировки электронного потока в области образования виртуального катода. Данный эффект носит резонансный характер и наблюдается только на частотах, близких к частоте колебаний виртуального катода.

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

3. Ограничение длительности импульса СВЧ излучения в релятивистском двухзазорном виртоде, кроме известных плазменных эффектов, определяется также изменением конфигурации электромагнитного поля в первом зазоре двухсекционного резонатора релятивистского виртода из-за накопления в нем избыточного пространственного заряда вследствие смещения виртуального катода в область первого зазора. Изменение формы и вида колебаний поля в первой секции резонатора нарушает механизм обратной связи в виртоде и препятствует формированию плотного электронного сгустка в об-

ласти виртуального катода из-за ухудшения взаимодействия пучка с полем, что приводит к срыву СВЧ колебаний в виртоде.

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

**Апробация работы и публикации.** Настоящая диссертационная работа выполнена на кафедре электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов и в НИИ естественных наук (отделение физики нелинейных систем) СГУ.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении НИР, выполняемых в рамках Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы; проектов Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 09-02-00255, 10-02-20002, 12-02-90022, 12-02-00345, 12-02-33071, 13-02-01209, 13-02-90406, 14-02-31204); Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проекты НШ-3407.2010.2 и НШ-1430.2012.2); грантов президента РФ для поддержки молодых кандидатов и докторов наук (гранты МД-345.2012.2, МК-672.2012.2, МД-345.2013.2, МК-818.2013.2, МК-1373.2014.2);



проектов Министерства образования и науки РФ (гранты 14.В37.21.1289, 14.В37.21.0764, 14.В37.21.0751, 14.В37.21.0059, №3.59.2014/К).

Представленные результаты неоднократно докладывались на различных семинарах и конференциях Всероссийского и Международного уровня, среди которых: XIII и XIV Всероссийская школа-семинар “Волновые явления в неоднородных средах” (Звенигород, май 2012; май 2014), IX и X Международная школа “Хаотические автоколебания и образование структур” (Саратов, октябрь 2010; октябрь 2013), XIII и XIV Всероссийская школа-семинар “Физика и применение микроволн” (Звенигород, май 2011; май 2013), 21, 22, 23 и 24 Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”(Севастополь, сентябрь 2011; сентябрь 2012; сентябрь 2013; сентябрь 2014), XV Международная Зимней школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике (Саратов, февраль 2012), 9th CST European User Conference 2014 (Germany, Berlin, May 2014).

Результаты диссертационной работы дважды докладывались и обсуждались на научном семинаре кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов.

По материалам диссертации опубликовано 10 научных статей в журналах, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций [84–93], 12 работ в трудах конференций [?, 94–103, 105], получены патент РФ на изобретение [106] и 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ [107–111].

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 157 страниц текста и 62 иллюстрации. Библиографический список содержит 141 наименование.

**Во введении** обоснована актуальность тематики проведенных исследований, их новизна и практическая значимость, сформулирована цель иссле-

дований и приведены основные результаты, выводы и положения диссертационной работы, выносимые на защиту, дано краткое изложение содержания работы.

**В первой главе** диссертационной работы описаны одномерные стационарная аналитическая и нестационарная численная модели неавтономного нерелятивистского электронного пучка в режиме формирования виртуального катода. Подробно изложены физические аспекты моделируемых процессов, особое внимание уделено описанию особенностей численного моделирования, выбора и обоснования численных, а также их параметров. Приводятся основные результаты численного и аналитического изучения процессов в неавтономных и связанных пространственно-распределенных пучково-плазменных систем с виртуальным катодом с помощью реализации описанных численных алгоритмов на ЭВМ.

Раздел 1.2 данной главы посвящен изучению влияния внешнего гармонического сигнала на динамику пучка с виртуальным катодом и выходные характеристики СВЧ генератора на виртуальном катоде. В подразделе 1.2.1 обсуждается постановка стационарной аналитической модели неавтономного пучка и ее результаты. В подразделе 1.2.2 приводится подробное построение численной одномерной квазиэлектростатической *particle-in-cell* модели электронного потока под внешним воздействием. Результаты численного моделирования пучка под воздействием внешнего гармонического сигнала изложены в подразделе 1.2.3.

В разделе 1.3 данной главы описываются особенности неавтономного поведения генераторов на виртуальном катоде, связанных однонаправленно. Подраздел 1.3.1 посвящен изучению зависимости выходных характеристик цепочки связанных генераторов на виртуальном катоде от параметра связи и управляющих параметров ведущей и ведомой систем. В 1.3.2 приводятся

результаты исследования вопроса о возможности установления в рассматриваемой цепочке однонаправленно связанных генераторов на виртуальном катоде режимов синхронного поведения, таких как синхронизация временных масштабов и обобщенная синхронизация.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена изложению особенностей создания, оптимизации и моделирования схемы неавтономного низковольтного виркатора, за основу которой взята конструкция экспериментальной установки, изучаемой в научной группе Саратовского государственного университета под руководством Ю.А. Калинина.

В разделе 2.2 детально описывается процесс создания трехмерной численной particle-in-cell модели автономного нерелятивистского генератора на виртуальном катоде при помощи программного комплекса CST Particle Studio. Подраздел 2.2.1 касается вопросов разработки и математической оптимизации геометрии автономной схемы, включая геометрические размеры элементов электронной пушки и пространства дрейфа, а также выходной замедляющей структуры, параметров пучка и распределения внешнего магнитного поля. В подразделе 2.2.2 приведены результаты численного моделирования нестационарных процессов в пучке с виртуальным катодом в нерелятивистском виркаторе.

Раздел 2.3 посвящен анализу неавтономной низковольтной виркаторной системы. В подразделе 2.3.1 описывается изменение конструкции виркатора для ввода внешнего сигнала и проводится оптимизация ввода сигнала с целью достижения наибольшей эффективности воздействия высокочастотного поля, создаваемого внешним сигналом, на электронный пучок. Также в данном подразделе приводятся результаты исследования влияния внешнего гармонического сигнала на выходные характеристики низковольтной виркаторной системы в рамках трехмерного численного моделирования. Подраздел

2.3.2 посвящен сопоставлению результатов теоретического анализа с результатами экспериментального исследования воздействия внешним монохроматическим сигналом на характеристики низковольтного виркатора, проведенного в научной группе профессора Ю.А. Калинина (СГУ, Саратов).

**В третьей главе** диссертационной работы подробно исследуется вопрос о неавтономной динамике релятивистских пучков с виртуальным катодом в устройствах высокомошной СВЧ электроники в рамках трехмерного полностью электромагнитного численного моделирования. В качестве рассматриваемой модели системы СВЧ электроники больших мощностей, содержащей релятивистский электронный поток с виртуальным катодом выбрана схема двухзазорного релятивистского виртода. Особое внимание в данной главе уделено вопросу создания виркатора-усилителя на базе известной модели двухзазорного виркатора.

Раздел 3.2 посвящен описанию принципов работы двухзазорного виркатора и особенностей численного моделирования данной системы с помощью программного комплекса CST Particle Studio. В данном разделе детально описаны основные физические механизмы и особенности конструкции двухзазорного виртода, приводящие к генерации стабильного СВЧ излучения высокого уровня мощности (подраздел 3.2.1), а также подробно изложены вопросы, касающиеся создания трехмерной модели в CST Particle Studio и сравнения результатов численного моделирования с известными экспериментальными работами исследователей из научных групп из Института сильноточной электроники СО РАН (г. Томск) и Израильского института технологий “Технион” (г. Хайфа, Израиль) (подраздел 3.2.2).

В разделе 3.3 детально описано преобразование конструкции релятивистского двухзазорного генератора на виртуальном катоде для создания усилителя на базе этого прибора (подраздел 3.3.1). Подраздел 3.3.2) посвящен

расчету выходных характеристик предложенного виркатора-усилителя и их зависимости от характеристик внешнего сигнала и геометрических параметров конструкции прибора.

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

# Глава 1

## Генератор на виртуальном катоде с предварительной модуляцией электронного потока (одномерное рассмотрение)

[84–86, 88–92]

### 1.1 Введение

Одной из актуальных проблем СВЧ электроники больших мощностей является проблема повышения выходной мощности и КПД приборов. Особенно остро эта проблема стоит для такого класса устройств, как генераторов на виртуальном катоде (ВК) или виркаторов. Несмотря на большую выходную мощность эти приборы обладают сравнительно низким КПД, что делает их менее конкурентоспособными по сравнению с другими приборами электроники больших мощностей.

Известно, что обратная связь и предмодуляция электронного пучка способствуют стабилизации генерации и в некоторых случаях приводят к увеличению выходной мощности СВЧ генераторов. Однако, выявлению и исследованию механизмов повышения мощности неавтономных генераторов на виртуальном катоде посвящено не так много работ.

В данной главе диссертационной работы в качестве основной модели будет рассмотрена схема низковольтного виркатора с дополнительным тормо-

жением пучка. Данный прибор был предложен в Саратовском государственном университете экспериментальной группой под руководством профессора Ю.А. Калинина и детально исследован в работах Д.И. Трубецкого, Ю.А. Калинина и А.Е. Храмова [41, 52, 117–119]. Автономная схема этого прибора была достаточно полно изучена как экспериментально, так и теоретически. Несмотря на небольшую выходную мощность, рассматриваемый прибор является перспективным источником широкополосного СВЧ излучения. Также низковольтный виркатор демонстрирует ряд интересных нелинейных эффектов, что делает его интересным объектом для исследований с позиций нелинейной динамики и динамического хаоса в электронных приборах СВЧ диапазона [119].

Изучение неавтономной динамики низковольтного виркатора с торозящим полем было проведено на экспериментальной установке в научной группе Ю.А. Калинина, схема которой представлена на рисунке 1.1. Пучок, инжектируемый катодом, приобретает ускорение в пространстве катод-анод под действием ускоряющего напряжения  $V_0$  на аноде. Вблизи катода располагается электронно-оптическая система, представляющая собой совокупность электродов, которая фокусирует и формирующая поток заряженных частиц.

При движении вдоль оси  $x$  сформированный пучок пересекает две области: пространство модуляции и пространство дрейфа. В пространстве модуляции расположен отрезок спиральной электродинамической структуры (ОСЭС), осуществляющей модуляцию пучка внешним сигналом. Покидая эту область, промодулированный по скорости пучок попадает в пространство дрейфа. Пространство дрейфа отделено от пространства модуляции входной сеткой, находящейся под потенциалом анода  $V_0$ , и выходной сеткой от коллекторной части. В пространстве дрейфа происходит основная колебательная динамика пространственного заряда электронного пучка, связанная с обра-

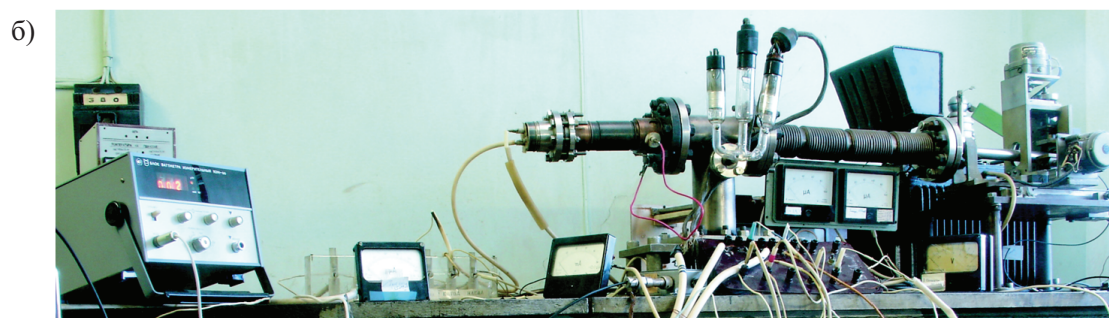
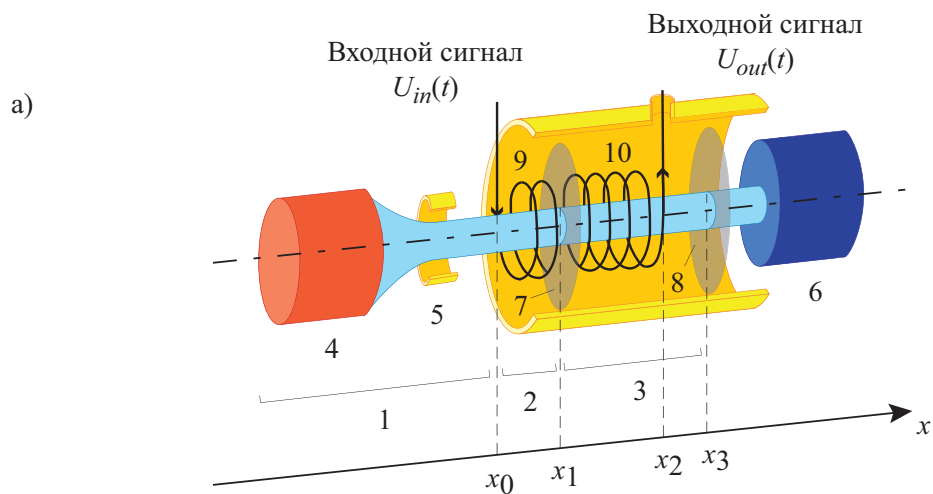


Рис. 1.1: (а) Схема исследуемой неавтономной модели низковольтного виркатора: 1 – электронная пушка; 2 – пространство модуляции; 3 – пространство дрейфа; 4 – катод; 5 – анод; 6 – коллектор; 7– входная сетка; 8 – выходная сетка; 9 – отрезок модулирующей спиральной электродинамической структуры; 10 – отрезок выходной спиральной электродинамической структуры. (б) Фотография экспериментальной установки.



зованием и динамикой виртуального катода. Стоит заметить, что в данной схеме выходная сетка играет важную роль в формировании виртуального катода – на выходную сетку подается напряжение  $V_0 - \Delta V$ , где  $\Delta V$  – тормозящая разность потенциалов. Таким образом, в пространстве дрейфа создается дополнительное тормозящее поле, которое способствует формированию виртуального катода, а также позволяет снизить критические токи, при которых образуется виртуальный катод. Вывод мощности колебаний пространственного заряда производится с помощью отрезка выходной спиральной электродинамической структуры, расположенной в области образования виртуального катода. Подробнее о результатах экспериментального исследования описанной схемы будет говориться в главе 2.

В первой главе диссертационной работы будет проведен анализ упрощенной одномерной модели неавтономного низковольтного виркатора. Раздел 1.2 первой главы посвящен изучению воздействия внешнего гармонического сигнала на динамику пучка и основные характеристики выходного излучения СВЧ прибора. При рассмотрении данного вопроса особое внимание уделено построению аналитической модели неавтономной динамики пучка (подраздел 1.2.1) и проведению численного моделирования (подразделы 1.2.2-1.2.3). Результаты, приведенные в данном разделе позволяют понять основные механизмы и сформулировать принципы увеличения выходной мощности в системах с образованием виртуального катода за счет подачи внешнего гармонического сигнала.

В разделе 1.3 рассматривается неавтономная динамика низковольтных виркаторов при объединении этих устройств в цепочку. В подразделе 1.3.1 проводится подробное описание управления характеристиками выходного сигнала подобных неавтономных систем (мощность ширина полосы, частота). Подраздел 1.3.2 посвящен анализу нелинейных эффектов взаи-

модействия связанных автоколебательных систем пучково-плазменной природы с позиций установления режима хаотической синхронизации.

## 1.2 Внешнее гармоническое воздействие на пучок в тормозящем поле

Начнем рассмотрение неавтономной динамики пучка в генераторе на виртуальном катоде с простой ситуации – воздействие на электронную систему внешнего гармонического сигнала. Подробное изучение этого вопроса, основанное на теоретическом и численном анализе поведения электронного потока под внешним воздействием, позволит сформулировать основные выводы о процессах, протекающих в электронном потоке под внешним воздействием, и выявить базовые механизмы управления динамикой пучка внешним сигналом и выходными характеристиками СВЧ излучения прибора.

### 1.2.1 Теоретическая модель

Изучение процессов, протекающих в неавтономных пучках с виртуальным катодом, начнем с рассмотрения простой кинематической модели динамики электронного потока. При этом, для создания такой аналитической модели, необходимо учесть некоторые особенности поведения электронных потоков со сверхкритическим током в режиме формирования виртуального катода.

Известно, что при инжекции интенсивного электронного пучка со сверхкритическим током  $I_0$  в некоторое пространство дрейфа в нем образуется нестационарный виртуальный катод, который совершает пространственно-временные колебания. Помимо отражения части потока обратно к области инжекции, виртуальный катод совершает модуляцию электронного потока в пространстве дрейфа на частоте собственных колебаний  $\omega_{vc}$ , которая связана с плазменной частотой  $\omega_p$  [8]. Отражение промодулированного потока в

данной системе образует распределенную обратную связь в пучке, что является одним из основных факторов, способствующих процессам образования электронной структуры (виртуального катода) в пучке и генерации в системе [120]. Учитывая тот факт, что в низковольтной системе с торможением пучка присутствует дополнительное тормозящее электроны поле, обусловленное отрицательной разностью потенциалов между сетками, ограничивающими пространство дрейфа, движение пучка в такой системе можно рассматривать, как движение заряженных частиц в тормозящем поле. Особенностью рассмотрения такой задачи является наличие у тормозящего поля двух составляющих – постоянной, создаваемой тормозящей разности потенциалов  $U_d$  между сетками диодного промежутка, и переменной, соответствующей колебаниям виртуального катода  $U_{vc}$ .

Помимо этого, можно принять следующие упрощения динамики виртуального катода, которые позволят получить аналитическое решение поставленной задачи, не нарушая при этом существенно, как покажем далее, общности получаемых результатов:

- виртуальный катод является стационарным в пространстве, т.е. формируется на некотором фиксированном расстоянии  $D$  от плоскости инжекции электронного потока, совершая при этом колебания во времени;
- потенциал виртуального катода совершает колебания во времени в соответствии с гармоническим законом  $U_{vc} \cos(\omega_{vc}t)$ , где  $U_{vc}$  – амплитуда колебаний потенциала в точке формирования виртуального катода;
- электронный поток полностью отражается от виртуального катода;
- одномерное движение пучка.

Учитывая вышесказанное, упрощенная схема для изучения поведения электронного потока в низковольтном вирткатодере с дополнительным тормо-

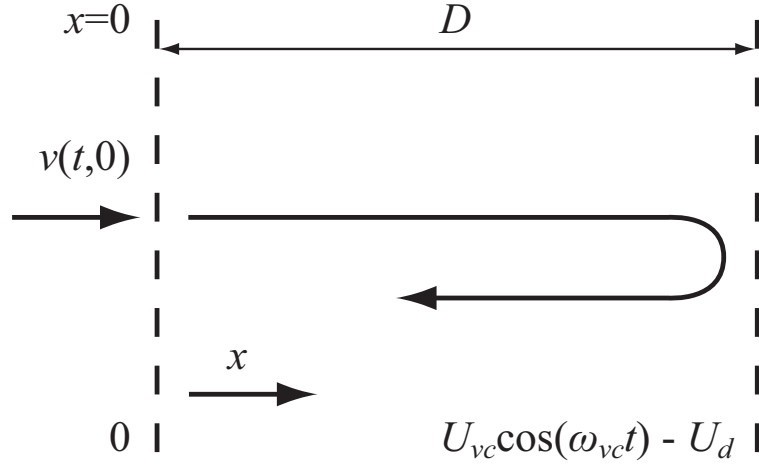


Рис. 1.2: Упрощенная модель динамики электронного потока в рамках стационарного теоретического анализа.

жением представлена на рисунке 1.2. Влияние внешнего гармонического сигнала учитывается как предварительная скоростная модуляция электронного потока на входе в диодный промежуток на частоте внешнего сигнала  $\omega_{ext}$  и с глубиной  $X$ .

Поставленную аналитическую задачу удобно решать, переходя к безразмерным переменным. Представим используемые физические величины в следующем виде:

$$x' = Dx, v' = v_0 v, t' = (D/v_0) t, \omega' = (v_0/D) \omega, U' = (v_0^2/\eta) U \quad (1.1)$$

Здесь  $x$  – пространственная координата;  $D$  – расстояние от плоскости инжекции до виртуального катода;  $v$  – скорость частицы;  $v_0$  – невозмущенная скорость частицы, с которой она покидает электронную пушку;  $t$  – время;  $\omega$  – частота;  $U$  – потенциал электрического поля;  $\eta = e/m_e$  – удельный заряд электрона. В нормировке (1.1) штрихами обозначены размерные величины

В рамках описанной простой аналитической модели движение заряженной частице в диодном промежутке под действием тормозящего поля и колебаний виртуального катода будет подчиняться уравнению:

$$\ddot{x} = (U_{vc} e^{j\omega_{vc} t} - U_d) \quad (1.2)$$

Рассмотрим начальные условия, накладываемые на величины, характеризующие поведение частицы, в момент ее влета в пространство дрейфа, с учетом предварительной модуляции по скорости внешним сигналом:

$$t = t_1, \quad x = 0, \quad \dot{x}(0, t_1) = v_0 (1 + X \sin(\omega_{ext} t_1)) \quad (1.3)$$

Теперь проинтегрируем (1.2) с учетом начальных условий (1.3) и получим уравнение для скорости частицы:

$$\dot{x} = (1 + X \sin(\omega_{ext} t_1)) - j \frac{U_{vc}}{\omega_{vc}} (e^{j\omega_{vc} t} - e^{j\omega_{vc} t_1}) - U_d (t - t_1) \quad (1.4)$$

В данном случае глубина предварительной скоростной модуляции пучка внешним гармоническим сигналом определяется величиной  $X$ . Помимо этого, внимательное рассмотрение данного уравнения позволяет сделать вывод о том, что безразмерный параметр  $U_{vc}/\omega_{vc}$  имеет физический смысл глубины модуляции электронного потока в пространстве дрейфа за счет колебаний потенциала в области формирования виртуального катода.

Интегрирование (1.4) позволяет получить уравнение, описывающее траекторию частицы в пространстве дрейфа:

$$x = (1 + X \sin(\omega_{ext} t_1)) (t - t_1) - \frac{U_{vc}}{\omega_{vc}^2} (e^{j\omega_{vc} t} - e^{j\omega_{vc} t_1} - j\omega_{vc} e^{j\omega_{vc} t_1} (t - t_1)) - U_d/2 (t - t_1)^2 \quad (1.5)$$

Рассмотрим возвращение отраженных от виртуального катода частиц к плоскости инжекции. Умножая (1.5) на  $\omega_{vc}$  и принимая  $x = 0$ , найдем уравнение, описывающее изменения угла пролета электронов  $\phi = \omega_{vc} (t - t_1)$  в пространстве дрейфа:

$$\phi (1 + X \sin(\omega_{ext} t_1)) - \mu (e^{j\phi} - j\phi - 1) e^{j\omega_{vc} t_1} - \beta \phi^2 = 0, \quad (1.6)$$

где  $\mu = U_{vc}/\omega_{vc}$  и  $\beta = U_d \omega_{vc}/2$ .

Теперь, зная закон изменения угла пролета заряженных частиц в диодном промежутке и учитывая закон сохранения заряда  $I dt = I_0 dt_1$ , определим выражение для описания сгруппированного тока пучка

$$I = I_0 \left( 1 + \frac{1}{\omega_{vc}} \frac{d\phi}{dt_1} \right)^{-1} \quad (1.7)$$

В данном случае, величина  $I_0$  определяет невозмущенный ток пучка в пространстве дрейфа и равна току инжекции.

Поиск аналитического решения уравнения (1.6) является затруднительным, поэтому для нахождения величины сгруппированного тока прибегнем к численному решению уравнения (1.6) и используем его при в выражении (1.7).

Важно заметить, что вывод мощности в системе осуществляется с помощью отрезка широкополосной спиральной замедляющей системы. Мощность СВЧ сигнала, регистрируемого спиральной системой, пропорциональна величине сгруппированного тока и представляется в виде  $P = \kappa I^2$ , где  $\kappa$  – коэффициент связи между электромагнитной волной в спиральной системе и пучком (сопротивление связи). Поэтому в данном случае корректно говорить об изменении сгруппированного тока пучка, как об изменении мощности выходного СВЧ излучения генератора на виртуальном катоде.

Анализ описанной теоретической стационарной модели низковольтного генератора на виртуальном катоде под внешним гармоническим воздействием показывает, что мощность выходного излучения генератора растет с увеличением глубины предварительной скоростной модуляции пучка на входе в пространство дрейфа (с увеличением мощности внешнего сигнала, модулирующего поток по скорости). Зависимость мощности  $K = P/P_0$  при увеличении глубины предварительной скоростной модуляции  $X$  в рамках построенной аналитической модели приведена на рисунке 1.3. Приведенные зависимости построены для трех различных значений величины тормозящего

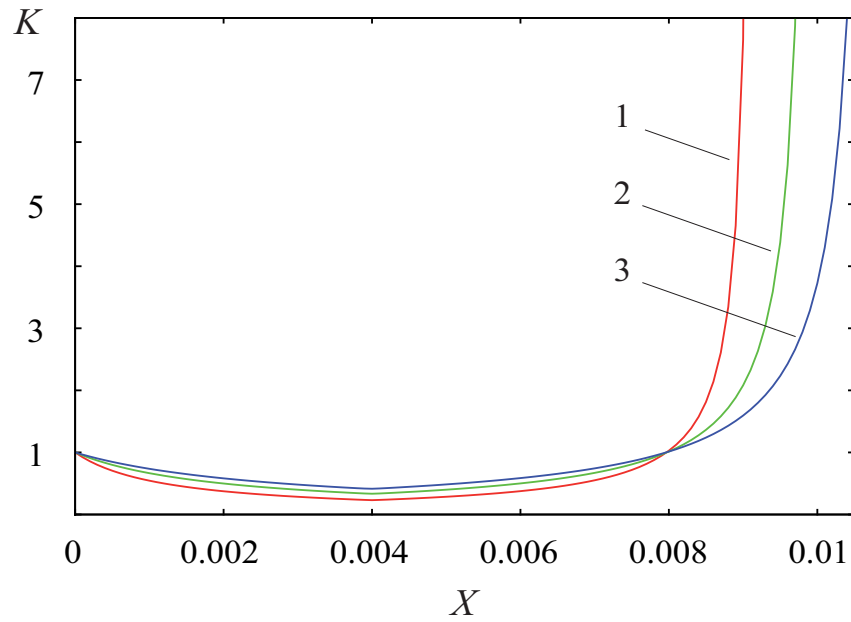


Рис. 1.3: Зависимость выходной мощности низковольтного виркатора относительно режима автономной генерации в зависимости от глубины предварительной модуляции пучка о скорости.

поля в диодном промежутке. Выбранные значения управляющих параметров выбраны таким образом, чтобы соответствовать величинам, которые можно использовать при работе с реальной экспериментальной установкой низковольтного виркатора.

Из рисунка видно, что нарастание глубины предварительной скоростной модуляции электронного потока  $X$  (иными словами увеличение мощности внешнего гармонического сигнала) приводит к росту мощности выходных колебаний генератора на виртуальном катоде. Рост выходной мощности происходит за счет увеличения тока сгруппированного в области виртуального катода пучка  $I(x, t)$ . Как показывает теоретическая модель, при экспериментально реализуемых значениях амплитуды входного сигнала увеличение мощности выходного излучения  $K$  может достигать  $5 \div 7$  раз. Так как в данном случае выходная мощность пропорциональна току пучка в области формирования виртуального катода, то рост величины  $K$  объясняется улучшением группировки электронного потока за счет скоростной модуляции внешним

сигналом, в то время как в отсутствие внешнего воздействия ( $X = 0$ ) группировка электронного потока только под воздействием колебаний потенциала в области осциллирующего виртуального катода мала. Стоит заметить, что зависимость величины  $K$  от глубины скоростной модуляции содержит участок незначительного уменьшения выходной мощности и сгруппированного тока пучка при  $X = 0 \div 0.004$ . Затем при увеличении амплитуды внешнего сигнала группировка электронного потока в диодном промежутке улучшается и выходная мощность начинает расти.

### 1.2.2 Численная модель

Результаты, полученные при изучении простой стационарной модели, основанной на упрощениях рассматриваемой реальной физической системы, позволяют сделать ряд выводов об особенностях поведения интенсивного электронного потока под внешним воздействием в режиме формирования виртуального катода. Однако, рассмотренная теоретическая модель не учитывает многих важных особенностей динамики пучка, в силу предпринятых упрощений. В частности, сделанные предположения о полном отражении электронного потока и стационарном положении виртуального катода в пространстве являются скорее частными случаями, нежели общими, реализуемыми при больших значениях тормозящего потенциала на выходной сетке. Для более детального анализа процессов в пучке с виртуальным катодом под воздействием внешнего сигнала необходимо прибегнуть к численному моделированию нестационарных процессов в пучке.

Существует ряд численных методик для описания динамики электронного потока в случае наличия обгонов и отражений (как в нашем случае). Одним из наиболее эффективных подходов для численного моделирования нестационарных процессов в интенсивных электронных пучках и плазме яв-



ляется метод крупных частиц и его разновидность “метод частиц в ячейке” (particle-in-cell method) [121, 122]. В этом случае исследуемая система представляет собой набор “крупных” заряженных частиц, взаимодействующих друг с другом через собственные поля и испытывающих влияние внешнего поля. При этом процесс численного моделирования можно условно разделить на два этапа: вычисление собственного поля, которое создают частицы, и расчет движения частиц в этом поле и во внешнем накладываемом на них электрическом поле. Изменение поля и движение частиц описываются дифференциальными уравнениями. Важной особенностью, отличающей данную модель от событий, протекающих при проведении экспериментов с реальной плазмой или пучками в лабораторных условиях, является принципиальная дискретность модели во времени и в пространстве в силу использования численных методов для решения уравнений. Несмотря на то, что положение частиц в пространстве описывается непрерывной функцией, дискретность пространства имеет место и объясняется использованием пространственной сетки, в узлах которой вычисляются значения поля. Такой способ задания поля является более целесообразным, чем прямое использование закона Кулона для описания взаимодействия между частицами, поскольку он существенно экономит вычислительные ресурсы ЭВМ и позволяет гораздо быстрее проводить необходимые расчеты, не теряя точности. Действительно, при определении поля удобнее использовать интегральную величину, такую как плотность пространственного заряда, нежели суммировать вклад отдельно взятых зарядов, когда число частиц достигает величин порядка  $10^5 \div 10^7$ .

Рассмотрим более детально особенности численного моделирования электронного пучка в рамках метода крупных частиц, применительно к исследуемой модели низковольтного виркатора. Для начала, как и в случае рассмотренной ранее теоретической модели, приведем все физические величины

к безразмерному виду для удобства последующей записи основных уравнений. Полный набор безразмерных физических величин, используемых при описании электронного потока в рамках метода частиц в ячейке, образуют следующие величины: пространственная координата  $x$ , время  $t$ , скорость частиц  $v$ , плотность пространственного заряда  $\rho$ , поле пространственного заряда  $E$ , потенциал поля пространственного заряда  $\varphi$ . Нормировка указанных величин записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} x' &= Lx, v' = v_0v, t' = (L/v_0) t, \\ \rho' &= \rho_0\rho, E' = (v_0^2/L\eta) E, \varphi' = (v_0^2/\eta) \varphi. \end{aligned} \tag{1.8}$$

Здесь  $L$  – длина пространства взаимодействия,  $v_0$  – скорость крупной частицы на входе в пространство взаимодействия,  $\rho_0$  – невозмущенная плотность пучка или плотность пучка на входе в пространство дрейфа, а штрихом обозначены соответствующие размерные физические величины.

Подготовительным этапом перед началом вычислительного процесса является определение параметров пространственной сетки, которой покрывается исследуемая модель, и временной сетки. Применение временных и пространственных сеток, которые являются чисто математическими объектами, может стать причиной возникновения нефизических эффектов. Появление численных ошибок в этом случае неустранимо, однако оптимальный выбор параметров численной схемы (параметров накладываемых пространственных и временных сеток) существенно снижает их уровень и обеспечивает устойчивость схемы. Численная схема является устойчивой и способна дать корректный результат, если шаги пространственной и временной сеток много меньше характерных масштабов процессов, протекающих в системе в пространстве и времени соответственно. Удобно связать шаги по пространству и времени соотношением  $\Delta t = \Delta x/N_0$ , где  $N_0$  – параметр численной схемы, означающий невозмущенное число частиц, приходящееся на одну ячейку. Такой параметр



Рис. 1.4: Алгоритм численного моделирования электронного пучка в рамках метода крупных частиц.

является важным при анализе движения пучков с помощью метода крупных частиц, поскольку для получения точных результатов требуется наличие хотя бы одной частицы в каждой ячейке. Естественно, чем более  $N_0$  и меньше  $\Delta x$ , тем точнее получаемые результаты. При этом значительно увеличивается общее число частиц в системе, а вместе с тем и затраты машинного времени. Поэтому при выборе параметров схемы необходимо соблюсти баланс между точностью и экономией ресурсов, затрачиваемых на решение поставленной задачи. При моделировании численном моделировании процессов в низковольтном генераторе на виртуальном катоде параметры схемы были выбраны следующим образом:  $N_c = 400$  – число ячеек,  $\Delta x = 1/N_c = 0.0025$  – шаг пространственной сетки,  $N_0 = 10$  – число частиц на ячейку в невозмущенном состоянии,  $\Delta t = \Delta x/N_0 = 0.00025$  – шаг по времени.

На рисунке 1.4 представлена блок-схема алгоритма для численного моделирования нестационарных процессов в интенсивных электронных потоках методом крупных частиц в самом простом виде. Первым шагом итеративного вычислительного цикла является расчет электрического поля в рабочем пространстве генератора на виртуальном катоде. Как было сказано ранее, поставленная задача численного моделирования динамики пучка со сверхкритическим током решается в рамках одномерного квазиэлектростатического моделирования. Поэтому для нахождения распределения потенци-

ала электрического поля  $\varphi$  справедливо применить уравнение Пуассона. В дифференциальном виде оно представляется следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -\alpha^2 \rho(x), \quad (1.9)$$

здесь  $\alpha = \omega_p L / v_0$  – безразмерный параметр Пирса, один из важных управляющих параметров динамики электронного потока, которой определяет степень надкритичности тока пучка. Уравнение Пуассона решается со следующими граничными условиями:

$$\varphi(0, t) = 0, \quad \varphi(\Delta, t) = \Delta\varphi, \quad (1.10)$$

где  $\Delta\varphi$  – тормозящая разность потенциалов между сетками, ограничивающими пространство взаимодействия генератора на виртуальном катоде.  $\Delta\varphi$  также является важным управляющим параметром системы, который существенно влияет на поведение пучка и реализующиеся в нем динамические режимы колебаний виртуального катода. Напряженность поля  $E$  находится по определению как  $E(x) = -\nabla\varphi(x)$ .

Уравнение (1.9) интегрируется численно с учетом граничных (1.10). Представим уравнение Пуассона (1.9) в конечно разностном виде с использованием представления производной по пространственной координате  $x$  в виде центральной разности:

$$\varphi_{j+1} - 2\varphi_j + \varphi_{j-1} = -(\alpha\Delta x)^2 \rho_j, \quad (1.11)$$

где  $j$  – индекс, обозначающий значение данной физической величины в  $j$ -ом узле. Полученное конечно-разностное уравнение (1.11) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, для решения которых можно использовать например метод распространения вектора ошибки [120, 121]. По найденным значениям потенциала электрического поля найдем распределение напряженности поля пространственного заряда, представляя оператор  $\nabla$

также в конечно-разностном виде с учетом одномерного поля:

$$E_j = \frac{\varphi_{j-1} - \varphi_{j+1}}{2\Delta x} \quad (1.12)$$

Движение частиц в пространстве взаимодействия описывается нерелятивистскими уравнениями движения, записанными для каждой отдельной частицы в виде:

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = E_i. \quad (1.13)$$

Индексу  $i$  соответствуют физические величины, которые описывают состояние  $i$ -ой крупной частицы. Начальными условиями для инжектируемых в пространство дрейфа частиц являются следующие условия:

$$t = t_1, \quad x(t_1) = 0, \quad v(t_1) = v_0, \quad (1.14)$$

здесь  $t_1$  – момент инжекции новой частицы в пространства дрейфа,  $v_0 = 1$  – нормированная невозмущенная скорость частицы или скорость, с которой частица покидает пушечную часть прибора.

Так как значение напряженности поля пространственного заряда определяется только в узлах пространственной сетки с помощью решения конечно-разностных уравнений, а координата частицы – величина непрерывная и может принимать любое значение, то для решения уравнения (1.13) необходимо провести интерполяцию функции  $E(x)$  для определения её значений между узлами пространственной сетки, т.е. в точках, где находятся крупные частицы  $x_i$  (второй шаг вычислительно цикла на рисунке 1.4). В рамках решения данной задачи используется билинейная интерполяция. Если частица с координатой  $x_i$  находится в ячейке пространственной сетки между  $j$  и  $(j + 1)$  узлами, то действующее на частицу электрическое поле в данной точке  $E_i$  определяется как:

$$E_i = E(x_i) = E(x_{j+1})(x_i - x_j) + E(x_j)(x_{j+1} - x_i) \quad (1.15)$$

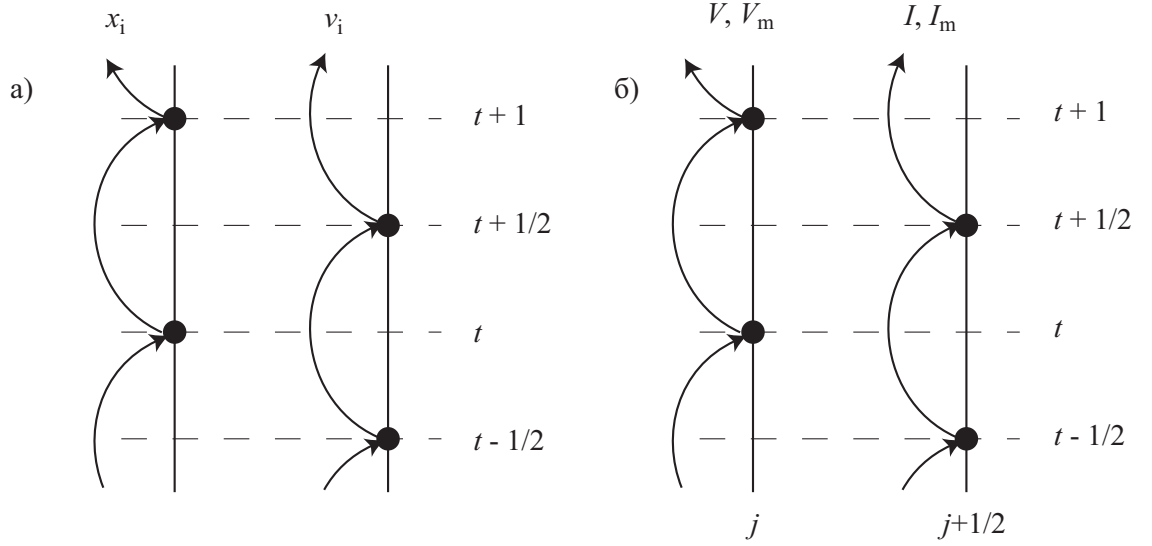


Рис. 1.5: Иллюстрация конечно-разностных схем с перешагиваниями для решения уравнений движения (а) и численного интегрирования телеграфных уравнений (б).

Для численного интегрирования нерелятивистского уравнения движения (1.13) используется численная схема с перешагиваниями. В этом случае, представим дискретные моменты времени как  $t_{old}$  – предыдущий момент времени и  $t_{new} = t_{old} + \Delta t$  – следующий момент времени, а затем перепишем уравнение движения (1.13) в виде системы двух уравнений:

$$\begin{aligned} v(t_{new}) &= v(t_{old}) + a(t_{av}) \Delta t, \\ x(t_{new}) &= x(t_{old}) + v(t_{av}) \Delta t, \end{aligned} \quad (1.16)$$

где  $x$ ,  $v$ ,  $a$  – координата, скорость и ускорение частицы соответственно, а  $t_{av} = t_{old} + \Delta t/2$  – средний момент времени между  $t_{new}$  и  $t_{old}$ .

Для удобства решения, в соответствии с рисунком 1.5(а), значения скорости  $v_i$  и координаты  $x_i$  крупной частицы определяются на разных временных сетках, которые смещены друг относительно друга на  $\Delta t/2$ . В конечном счете, решение уравнения движения  $i$ -ой крупной частицы сводится к решению следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} v_i^{t+1/2} &= v_i^{t-1/2} + E_i \Delta t, \\ x_i^{t+1} &= x_i^t + v_i^{t+1/2} \Delta t. \end{aligned} \quad (1.17)$$

В завершении итерации вычислительного цикла производится расчет интегральной характеристики электронного пучка – плотности пространственного заряда  $\rho$ . В то время как координаты частиц в ходе решения уравнений движения могут принимать любые значения в диапазоне  $[0;1]$ , плотность пространственного заряда, так же как и напряженность и потенциал электрического поля, определяется только в узлах пространственной сетки. Математической операцией, связывающей координаты частиц с интегральной величиной и величинами электрического поля, является процедура “взвешивания” частиц. В ходе выполнения этой процедуры вычисляются и складываются вклады отдельных частиц в плотность заряда ячеек. Если частица с индексом  $m$  находится между  $j$ -м и  $(j + 1)$ -м узлами пространственной сетки, то вклады этой частицы в плотность заряда в  $j$ -й и  $(j + 1)$ -й узлы:

$$\begin{aligned} q_i^j &= (j + 1) \Delta x - x_i, \\ q_i^{j+1} &= x_i - j \Delta x. \end{aligned} \tag{1.18}$$

Таким образом, суммируя вклады всех частиц, лежащих в промежутке  $[x_{j-1}; x_{j+1}]$ , получим полную плотность пространственного заряда в каждом  $j$ -ом узле:

$$\rho_j = \frac{1}{N_0} \sum_i q_{ij}. \tag{1.19}$$

Вычисление плотности пространственного заряда завершает выполнение одного вычислительного цикла. Рассчитанная таким образом с использованием процедуры взвешивания частиц плотность пространственного заряда используется на следующей итерации вычислительного цикла в уравнении (1.11) для расчета изменения электрического поля из-за перемещения заряженных частиц. Следуя описанному вычислительному циклу, проводилось численное моделирование задачи о самосогласованном взаимодействии интенсивного электронного пучка со сверхкритическим током с электрическим

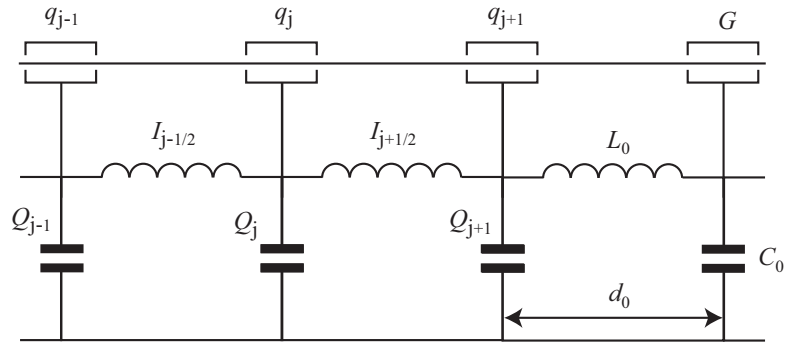


Рис. 1.6: Эквивалентная схема спиральной замедляющей системы, используемая при создании численной модели пучка методом крупных частиц.

полем в рабочей камере генератора на виртуальном катоде в рамках одномерного квазиэлектростатического моделирования.

Обратимся к схеме исследуемого неавтономного генератора на виртуальном катоде, изображенной на рисунке 1.1. Как видно, в системе присутствуют элементы ввода и вывода сигнала – спиральные электродинамические структуры. Выходной отрезок спирали расположен в камере дрейфа и захватывает область формирования и колебания виртуального катода, занимая промежуток  $x \in [0; L_{out}]$ , где  $L_{out}$  – длина выходной спирали. Входной отрезок занимает пространство между пушечной частью и рабочей камерой прибора. Эта область называется модулятором и занимает промежуток  $x \in [-L_m; 0]$ , где  $L_m$  – длина пространства модуляции и входной спирали.

Одним из эффективных подходов для численного моделирования процесса взаимодействия электронного потока со спиральной электродинамической системой является метод эквивалентных схем. В рамках данного подхода отрезок спиральной электродинамической структуры заменяется отрезком эквивалентной длинной линии в соответствии с рисунком 1.6. Таким образом заряд пучка, сосредоточенный в пространстве дрейфа, наводит заряд в эквивалентном контуре. Здесь  $I_{j-1/2}$  – наведенный ток, протекающий в контуре между  $j - 1$  и  $j$  узлами;  $V_j$  – напряжение в  $j$ -ом узле;  $C = C_0 \Delta x$  и  $L = L_0 \Delta x$  – емкость и индуктивность на ячейку  $\Delta x$  соответственно;  $Q_j$  – за-



ряд, запасенный в емкости узла  $j$ . Последнее является суммой заряда пучка  $q_j$  и наведенного заряда  $q'_j$  в узле  $j$ . В данном случае устойчивость численной схемы будет определяться правильным подбором параметров эквивалентного контура в соответствии с условиями соответствия фазовой скорости и сопротивления связи [118, 123]:

$$v_{ph} = \Delta x / \Delta t = 1 / \sqrt{L/C}, \quad Z_0 = \sqrt{L/C} = V^2 / 2P. \quad (1.20)$$

Тогда, уравнения, описывающие распространение волны в линии передачи, будут представлять собой систему телеграфных уравнений:

$$\frac{\partial V_j}{\partial t} = -\frac{1}{C_0} \frac{\partial I_j}{\partial x} + \frac{\kappa}{C_0} \frac{\partial q_j}{\partial t}, \quad (1.21)$$

$$\frac{\partial I_j}{\partial t} = -\frac{1}{L_0} \frac{\partial V_j}{\partial x}, \quad (1.22)$$

где  $\kappa$  – сопротивление связи спиральной системы.

Перепишем указанные уравнения в конечно разностном виде:

$$V_j^t = V_j^{t-1} - \Delta t v_{ph} Z_0 \left( \frac{\partial I_{j+1/2}^{t-1/2} - I_{j-1/2}^{t-1/2}}{\Delta x} - \kappa \frac{q_j^t - q_j^{t-1}}{\Delta t} \right), \quad (1.23)$$

$$I_{j-1/2}^{t+1/2} = I_{j-1/2}^{t-1/2} - \Delta t \frac{v_{ph}}{Z_0} \frac{V_j^t - V_{j-1}^t}{\Delta x}. \quad (1.24)$$

Из уравнений (1.23-1.24) видно, что напряжение и ток рассчитываются на смещенных друг относительно друга пространственных и временных сетках (рисунок 1.5(б)). При этом пространственные сетки смещены на  $\Delta x/2$ , а временные – на  $\Delta t/2$  по аналогии с системой уравнений (1.17) для описания движения крупных частиц. Численное моделирование взаимодействия пучка со входной и выходной спиралями осуществляется с помощью описанного выше метода и отличается постановкой граничных условий и рядом предположений. Обозначим через  $V_m$  и  $I_m$  – напряжение и ток во входной (модулирующей) спирали,  $V$  и  $I$  – напряжение и ток выходной спирали. Тогда:

1.  $V_m, I_m \in [-L_m; 0]$  с граничными условиями  $V_m(-L_m, t) = \varepsilon V_{ext}$ ,  $I_m(-L_m, t) = 0$ , где  $V_{ext}$  – внешний сигнал, а  $\varepsilon$  – коэффициент связи;
2.  $V, I \in [0; L_{out}]$  с граничными условиями  $V(0, t) = 0$ ,  $I(0, t) = 0$ . При этом  $V(L_{out}, t)$  – выходной сигнал генератора на виртуальном катоде;
3. движение частиц в пространстве модулятора определяется лишь полем, наводимым входной спиралью  $E_m = -\nabla V_m$ , без учета сил пространственного заряда;
4. в силу того, что рассматриваемый пучок за счет значительного изменения скорости в области виртуального катода не находится в синхронизме с замедленной волной, обратным влиянием волны выходной спирали на пучок в пространстве дрейфа можно пренебречь.

С учетом расчета процесса модуляции электронов по скорости при помощи входной спиральной системы и возбуждения выходной спиральной системы колебаниями пространственного заряда полный вычислительный цикл будет иметь вид, показанный на рисунке 1.7. Теперь итерацию вычислительного цикла завершает процедуры расчета ввода и вывода сигнала в генераторе на виртуальном катоде.

При анализе выходных характеристик генерируемого СВЧ излучения использовалась интегральная мощность выходного сигнала в силу того, что в большинстве случаев излучение исследуемого генератора на виртуальном катоде далеко от периодического. В этом случае, мощность выходных колебаний рассчитывалась следующим образом:

$$P = \frac{1}{(T - T_{tr}) \kappa} \int_{T_{tr}}^T V_{out}^2(t) dt. \quad (1.25)$$

Здесь  $t_{tr}$  – длительность переходного процесса,  $T$  – полное время расчета.

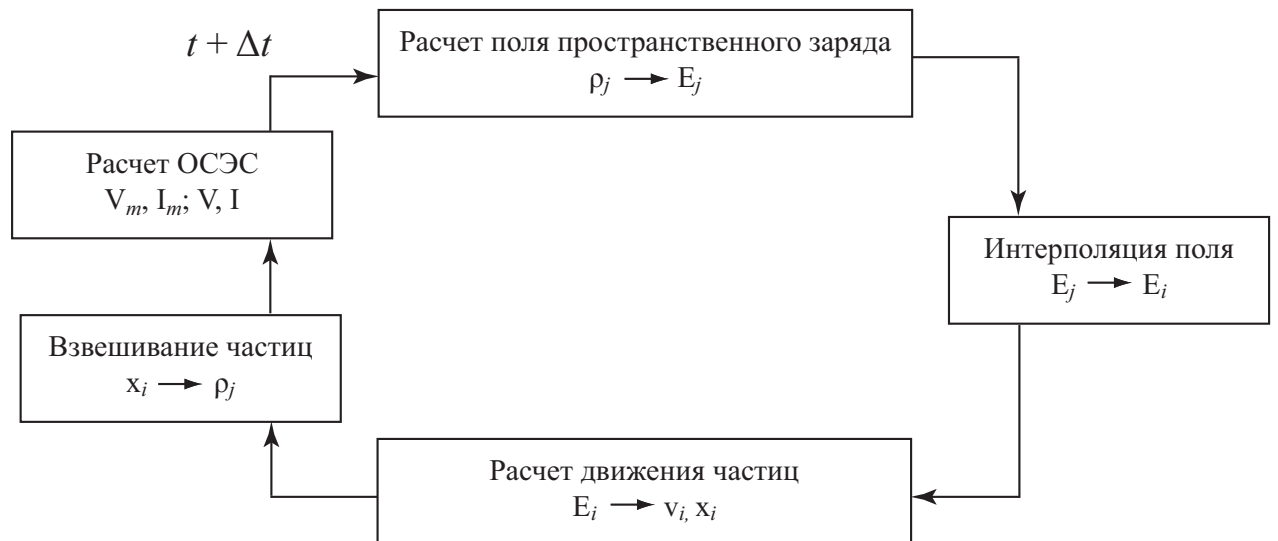


Рис. 1.7: Полный алгоритм численного моделирования электронного пучка в модели неавтономного виркатора в рамках метода крупных частиц.

### 1.2.3 Численный анализ процессов в неавтономном генераторе на виртуальном катоде

На основе описанного в предыдущем разделе алгоритма для моделирования была разработана программа для ЭВМ, позволяющая проводить численный анализ процессов, протекающих в генераторе на виртуальном катоде, содержащем нерелятивистский электронный пучок со сверхкритическим током. Для демонстрации работоспособности алгоритма рассмотрим некоторые характерные особенности автономной динамики, которые затем пригодятся при анализе неавтономной системы.

При определенных управляющих параметрах виркатора в пучке происходит образование виртуального катода, который совершает колебания в пространстве и времени [7, 24, 119]. На рисунке 1.8(а) с помощью пространственно-временной диаграммы показано поведение пучка в рабочей камере генератора в режиме формирования виртуального катода. Пространственно-временная диаграмма показывает траектории движения частиц в координатах  $(x, t)$ . Каждая линия соответствует траектории отдельной заряженной частицы. Видно, что при заданном тормозящем поле,

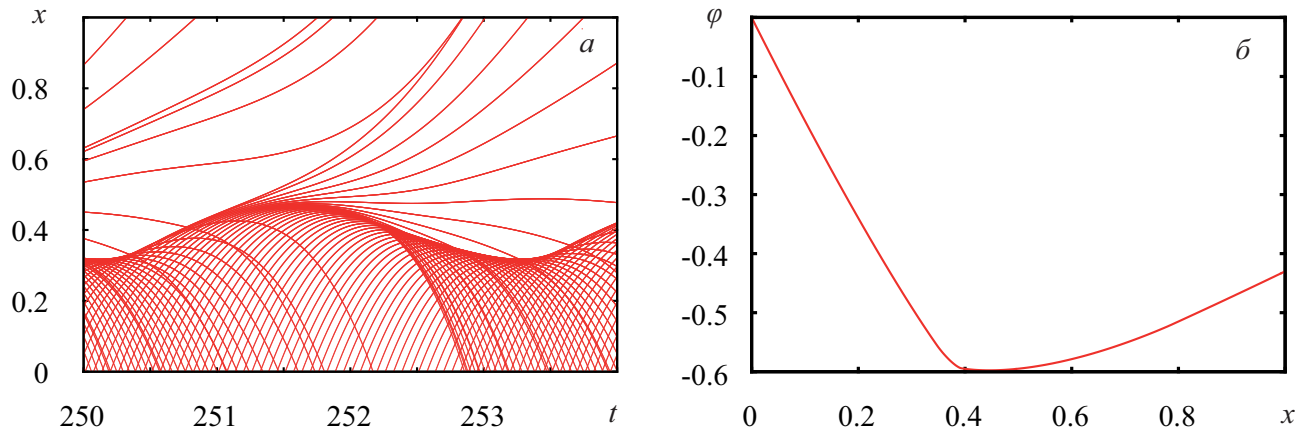


Рис. 1.8: Пространственно-временная диаграмма движения крупных частиц (а) и распределение потенциала в пространстве дрейфа (б). Параметры системы:  $\alpha = 0.9$ ,  $\Delta\varphi = 0.43$ .

определяющимся тормозящим потенциалом  $\Delta\varphi$ , и токе пучка  $I_0 \sim \alpha$ , превышающем критическое значение, часть заряженных частиц разворачивается и возвращается к области инжекции, а часть дрейфует к коллектору. При этом в области  $x = 0.3 \div 0.5$  наблюдается сгущение траекторий частиц. Такое уплотнение пространственного заряда вызывает провисание потенциала в пространстве дрейфа – образование виртуального катода (рисунок 1.8(б)), от которого частицы отражаются обратно к области входной сетки.

Из рисунка также видно, что при указанных параметрах системы виртуальный катод совершает колебания. Проследим за тем, как меняется колебательная динамика виртуального катода при изменении управляющих параметров. Для этого зафиксируем безразмерный параметр Пирса  $\alpha = 0.9$  и будем варьировать в широких пределах тормозящую разность потенциалов  $\Delta\varphi$ , наблюдая за изменением характеристик колебаний электрического поля  $E$  вблизи образования виртуального катода.

Нетрудно заметить, что изменение статического тормозящего поля в межсеточном зазоре рабочей камеры низковольтного виркатора приводит к существенной перестройке колебательного режима виртуального катода. При малых значениях управляющего параметра  $\Delta\varphi = 0.36$ , т.е. в на-

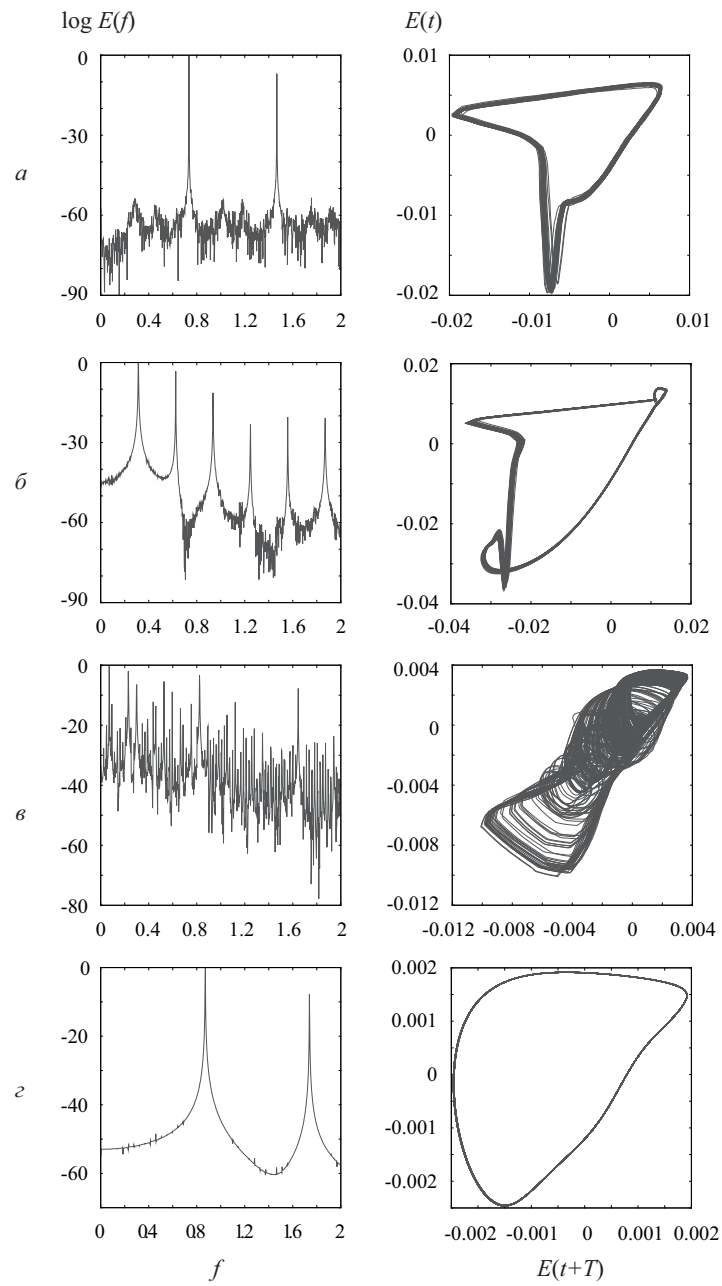


Рис. 1.9: Частотные спектры в логарифмическом масштабе (слева) и фазовые портреты (справа) колебаний электрического поля в области образования виртуального катода. Значения тормозящих потенциалов:  $\Delta\varphi = 0.36$  (а),  $\Delta\varphi = 0.43$  (б),  $\Delta\varphi = 0.55$  (в),  $\Delta\varphi = 0.66$  (г).

чале зоны генерации, виртуальный катод демонстрирует колебания, близкие к периодическим. В спектре колебаний присутствуют основная частота  $f_{vc} \approx 0.75$  ( $f'_{vc} \approx 0.9$ ) ГГц и её гармоники, а также шумовой пьедестал. Фазовый портрет колебаний также свидетельствует о регулярной динамике виртуального катода со слабовыраженной шумовой составляющей. Увеличение торможения электронного потока приводит к резкой перестройке режима колебаний виртуального катода – при  $\Delta\varphi = 0.43$  частота колебаний уменьшается практически в два раза  $f_{vc} \approx 0.35$  ( $f'_{vc} \approx 0.45$ ) ГГц, при этом шумовая компонента сохранилась примерно на том же уровне. Фазовый портрет также претерпел изменения, что говорит об изменении формы колебаний. Дальнейший рост величины тормозящего поля существенно усложняет динамику заряженных частиц в диодном промежутке, что приводит к хаотизации колебаний виртуального катода. Спектр таких хаотических колебаний является практически сплошным, а уровень шумового пьедестала резко возрастает и становится сравним с гармониками основной частоты колебаний  $f_{vc} \approx 0.8$  ( $f'_{vc} \approx 1.0$ ) ГГц и её гармониками. Наконец, при больших значениях тормозящего поля в межсеточном зазоре  $\Delta\varphi \geq 0.6$ , когда наступает происходит полное отражение частиц от виртуального катода и токопрохождение ко второй сетке отсутствует, колебания виртуального катода упрощаются и в системе реализуются периодические осцилляции практически в отсутствие шума. Такую динамику отражают как частотный спектр, где четко видны основная частота колебаний виртуального катода и гармоники, так и фазовый портрет – в данном случае изображающая точка описывает в фазовом пространстве замкнутую фазовую траекторию.

Обобщением всего вышесказанного является представление характеристик выходного излучения генератора на виртуальном катоде в зависимости от тормозящей разности потенциалов. На рисунке 1.10 изображена зави-

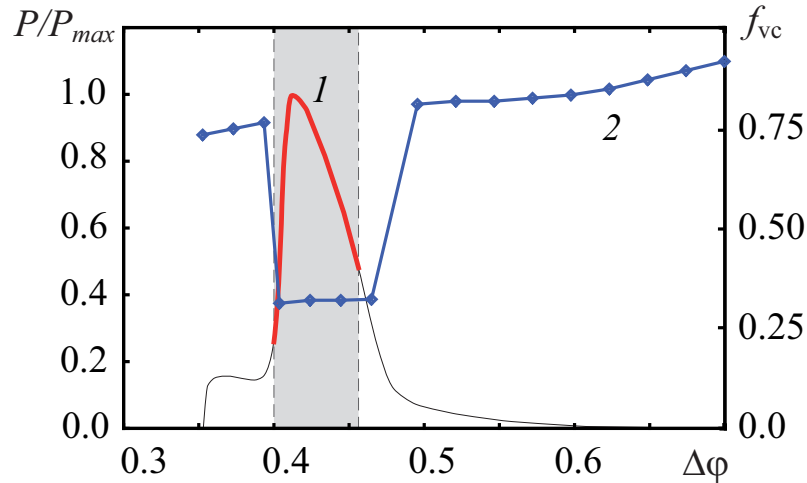


Рис. 1.10: Характеристики выходного СВЧ излучения низковольтного генератора на виртуальном катоде. На графике представлена зависимость нормированной интегральной выходной мощности генерации (1) и основной частоты колебаний (2) от управляющего параметра  $\Delta\varphi$  при фиксированном параметре Пирса  $\alpha = 0.9$ .

Зависимость интегральной выходной мощности колебаний виртуального катода, рассчитанная по формуле (1.25), и основной частоты этих колебаний. Длина отрезка спиральной выводящей системы была выбрана по аналогии используемой в экспериментальном макете [83, 117, 118] и равна половине длины пространства дрейфа  $L_{out} = 0.5$ . Расчет показывает, что при данной длине спирали максимальная мощность достигается при  $\Delta\varphi = 0.44$ . Это означает, что при таких управляющих параметрах отрезок спиральной замедляющей системы захватывает область формирования виртуального катода, и виртуальный катод наиболее эффективно возбуждает колебания в замедляющей системе. Следует заметить, что зависимость мощности (рис. 1.10, кривая 1), полученная в численном моделировании, хорошо согласуется с результатами экспериментального исследования низковольтного вирткатодного генератора.

Приведенная на рисунке зависимость частоты генерации от тормозящей разности потенциалов подробно объяснена ранее и её поведение связано с изменением колебательных режимов виртуального катода при варьировании управляющего параметра.

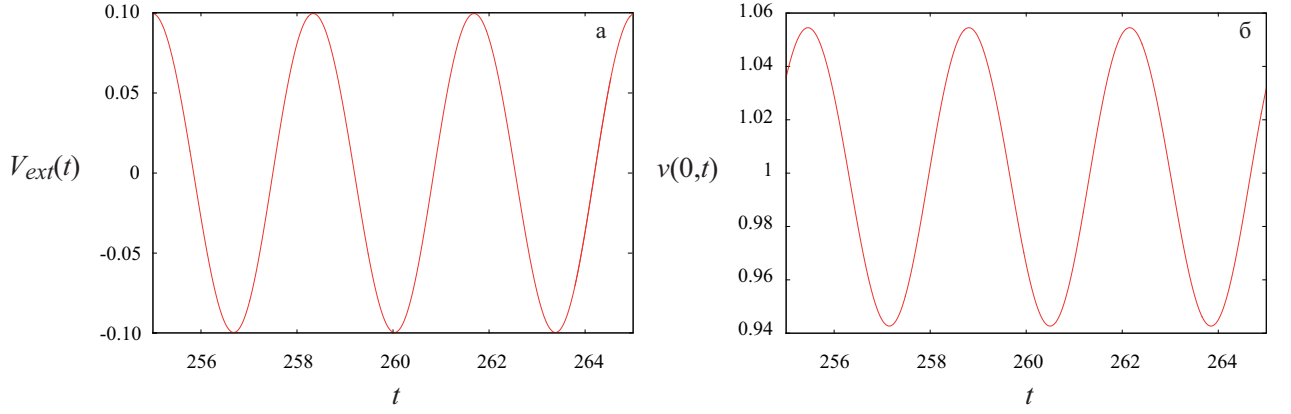


Рис. 1.11: Управляющий внешний гармонический сигнал (а) и распределение скоростей заряженных частиц на входе в систему под воздействием предварительной скоростной модуляции пучка внешним сигналом (б). Параметры внешнего сигнала:  $V_{ext} = 0.1$ ,  $f_{ext} = 0.32$

Перейдем к рассмотрению неавтономной схемы генератора на виртуальном катоде. В этом случае заряженные частицы эмитируются с плоскости, которая находится на расстоянии  $L_m$  слева от входной сетки и в области  $x \in [-L_m; 0]$  движется под действием поля модулирующей спирали. Таким образом, при подаче на входную спираль внешнего гармонического сигнала в пространство дрейфа поступает промодулированный по скорости на частоте внешнего воздействия  $f_{ext}$  поток заряженных частиц (см. рисунок 1.11).

Численный анализ нестационарных процессов в электронном пучке с виртуальным катодом показывает, что в описанной низковольтной системе предварительная скоростная модуляция электронного потока при определенном выборе параметров внешнего воздействия (таких как амплитуда и частота) приводит к значительному увеличению уровня интегральной мощности выходного СВЧ-излучения. Рисунок 1.12 иллюстрирует поведение выходной мощности генератора на ВК с предварительной модуляцией пучка при увеличении мощности внешнего воздействия (мощность внешнего воздействия прямо связана с глубиной модуляции). В данном случае показана ситуация, когда частота внешнего воздействия равна частоте собственных колебаний ВК ( $\omega_{ext} = \omega_{VC}$ ). При такой частоте внешнего воздействия, сигнал с ам-



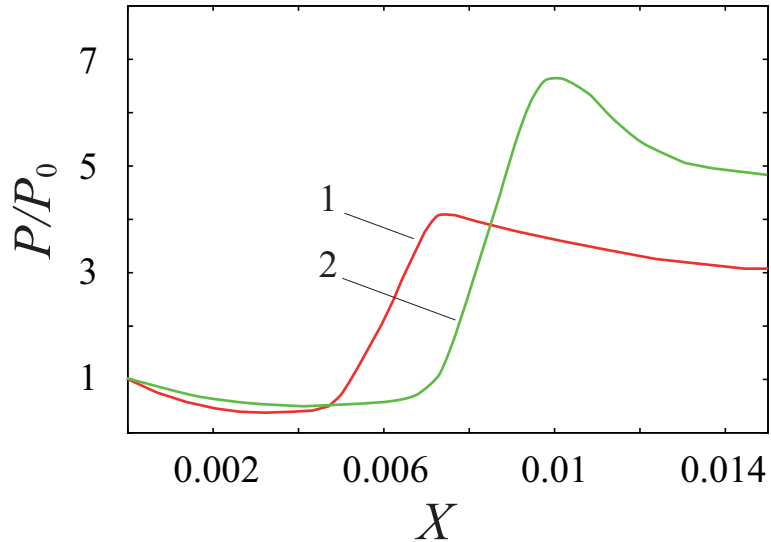


Рис. 1.12: Численно рассчитанные зависимости выходной мощности низковольтного виркатора в зависимости от глубины предварительной скоростной модуляции пучка на входе в пролетный промежуток для разных величин тормозящей разности потенциалов. Кривая 1 –  $\Delta\varphi = 0.46$ , кривая 2 –  $\Delta\varphi = 0.47$

плитудой  $V_{ext} = 0.1$ , поданный на модулирующую спираль, вызывает скоростную модуляцию электронного потока глубиной 5% ( $X \sim 0.05$ ). На рис. 1.12 представлена зависимость выходной мощности низковольтного виркатора под внешним гармоническим воздействием от глубины предварительной скоростной модуляции. Исходя из рис. 1.12, можно отметить несколько характерных особенностей динамики выходной мощности системы:

- уменьшение мощности при малых значениях глубины предварительной скоростной модуляции потока, дальнейший рост и наличие ярко выраженного максимального значения выходной мощности генератора при дальнейшем увеличении мощности внешнего воздействия;
- смещение пика кривой при увеличении тормозящего поля в пролетном промежутке.

Видно, что численное моделирование подтверждает возможность увеличения мощности в низковольтном виркаторе за счет предварительной модуляции электронного потока, показанной в рамках стационарной теоретической модели. Однако, теоретическая модель не отражает дальнейшего

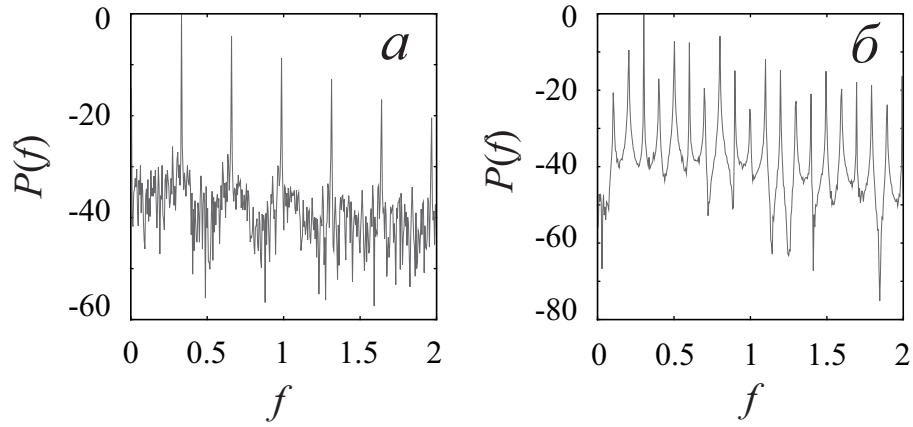


Рис. 1.13: Частотные спектры выходного излучения низковольтного виркатора в отсутствии внешнего воздействия (а –  $\Delta\varphi = 0.46$ , б –  $\Delta\varphi = 0.47$ )

спада мощности при увеличении скоростного разброса электронного потока на входе в пролетный в промежуток. Следует отметить, что вид зависимости интегральной выходной мощности исследуемой системы от глубины модуляции потока на входе является качественно одинаковым для любого значения тормозящей разности потенциалов, при котором возможна генерация низковольтного виркатора в автономном режиме, и, следовательно, не зависит от режима колебаний виртуального катода. Кривые мощности построены для параметров генератора, соответствующих разным режимам колебаний виртуального катода в низковольтном виркаторе без внешнего воздействия ( $\Delta\varphi = 0.46$  и  $\Delta\varphi = 0.47$ ). На рис. 1.13 представлены спектры выходного излучения для соответствующих параметров автономного низковольтного виркатора – при  $\Delta\varphi = 0.46$  системе устанавливаются слабохаотические колебания (рис. 1.12(а)), а при  $\Delta\varphi = 0.47$  выходное излучение является регулярным и многочастотным (рис. 1.12(б)).

Такое поведение мощности объясняется с помощью построения и анализа пространственно-временных диаграмм и распределений плотности пространственного заряда в пролетном промежутке (рис. 1.14). Рассмотрим для определенности кривую, для которой величина тормозящей разности потенциалов равна  $\Delta\varphi = 0.46$ .

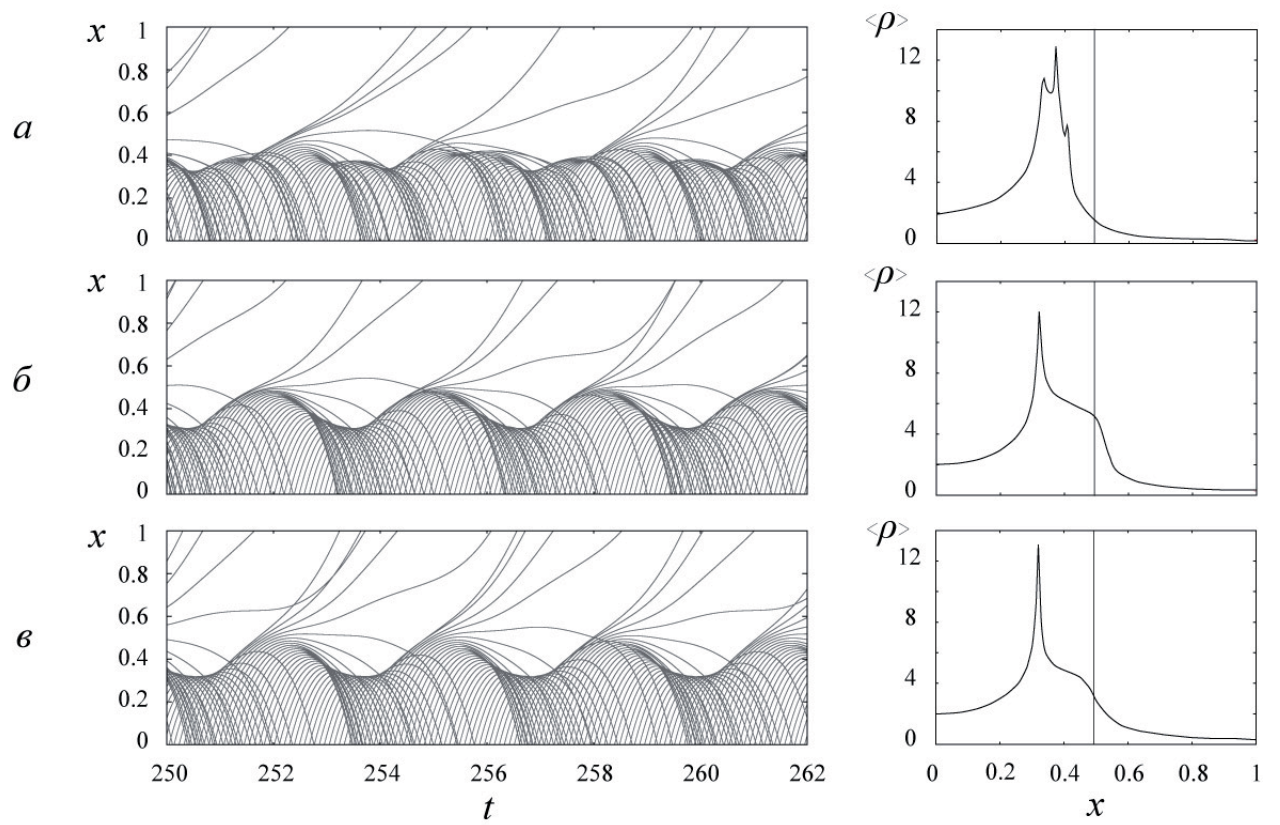


Рис. 1.14: Пространственно-временные диаграммы (слева) и средние плотности распределения пространственного заряда (справа), соответствующие характерным участкам зависимости выходной мощности от глубины предварительной модуляции для величины тормозящего потенциала  $\Delta\varphi = 0.47$ . (а –  $X = 0.004$ , б –  $X = 0.01$ , в –  $X = 0.014$ )

Воздействие на описанную низковольтную систему слабым внешним гармоническим сигналом приводит к тому, что величина глубины предварительной скоростной модуляции пучка принимает малые значения, то есть появляется минимальный скоростной разброс электронов на входе в пространство взаимодействия. Это ведет к разрушению структуры ВК, сформировавшейся в автономном режиме работы генератора (без первоначального разброса скоростей). На зависимости  $\langle \rho(x) \rangle$  наблюдается несколько максимумов, что свидетельствует о разрушении плотного сгустка в области ВК и формировании нескольких электронных структур. Следовательно, уровень выходной мощности испытывает небольшой спад при малых величинах амплитуды внешнего сигнала. Дальнейшее увеличение мощности внешнего воздействия приводит к тому, что предварительная модуляция потока по скорости обуславливает более эффективную группировку электронного потока в пролетном промежутке в области формирования ВК, а именно в плоскости  $x = l$ , соответствующей правой границе выходной линии передачи. Таким образом, при определенном соотношении величины глубины скоростной модуляции пучка на входе и значения тормозящей разности потенциалов между сетками пролетного промежутка в системе наблюдается максимальное значение мощности выходного сигнала, в следствие формирования наиболее плотных электронных сгустков в плоскости  $x = l$ . Последующий рост глубины предварительной скоростной модуляции потока приводит как к увеличению пролетного тока в диодном промежутке (из-за увеличения скоростного разброса частиц появляется большее количество электронов, способных преодолеть потенциальный барьер ВК), так и к перераспределению плотности пространственного заряда внутри области формирования ВК. Оба этих фактора определяют значительное падение выходной мощности генерации низковольтного виркатора при данной длине замедляющей системы  $l = 0.5$ ,

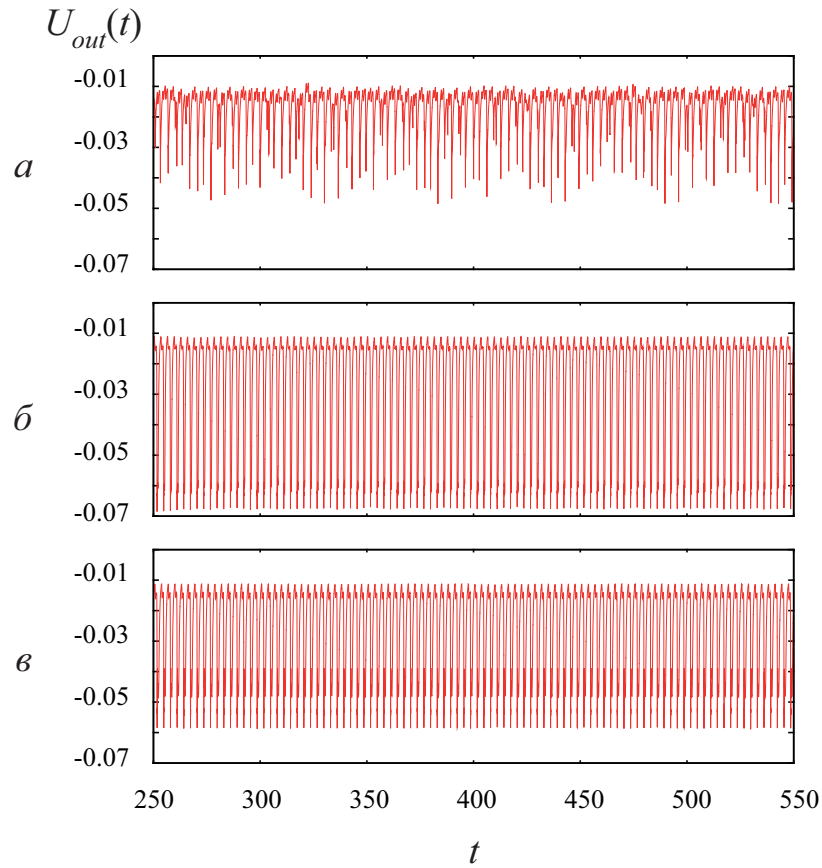


Рис. 1.15: Релизации выходного СВЧ-излучения низковольтного виркатора при различной глубине предварительной скоростной модуляции. Параметры генератора:  $\alpha = 0.9$ ,  $\Delta\varphi = 0.47$ ,  $X = 0.004$ (а),  $X = 0.01$ (б),  $X = 0.014$ (в)

потому что они приводят к уменьшению сгруппированного тока пучка в пространстве взаимодействия, охваченного спиралью.

На рис. 1.15 представлены реализации выходного СВЧ-сигнала при различных величинах глубины предварительной скоростной модуляции пучка на входе внешним гармоническим сигналом. Видно, что при малом внешнем воздействии генерация низковольтного виркатора является хаотической и демонстрирует колебания с малой амплитудой (рис. 1.15(а)). Увеличение мощности внешнего воздействия приводит к тому, что внешний сигнал навязывает периодическую динамику колебаниям виртуального катода, из-за чего колебания выходного излучения демонстрируют регулярную динамику. При этом при глубине модуляции  $X = 0.01$ , соответствующей максимальной выходной мощности генератора, амплитуда выходного сигнала принима-

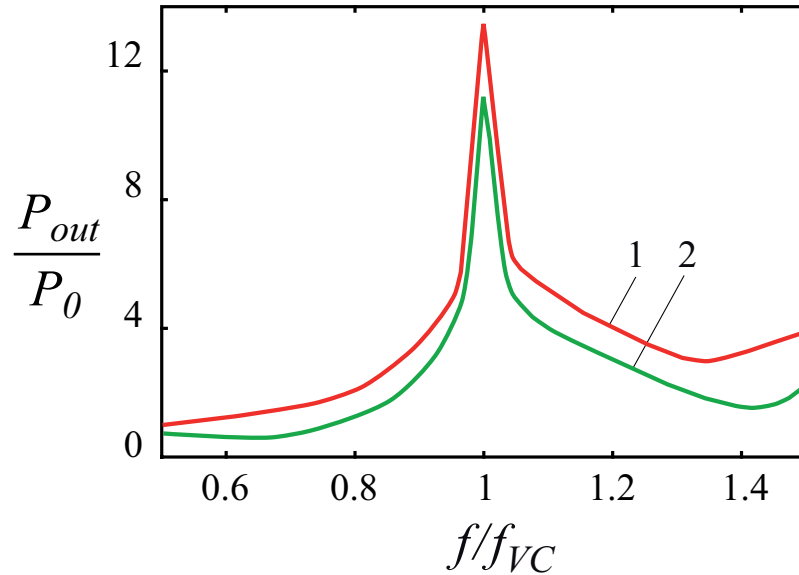


Рис. 1.16: Зависимость выходной интегральной мощности СВЧ-излучения низковольтного виркатора от частоты внешнего гармонического сигнала. Параметры генератора:  $\alpha = 0.9$ ,  $X = 0.008$ , кривая 1 –  $\Delta\varphi = 0.46$ , кривая 2 –  $\Delta\varphi = 0.47$ )

ет наибольшее значение (рис. 1.15(б)). Дальнейшее увеличение внешнего воздействия приводит к уменьшению амплитуды выходного СВЧ-сигнала (рис. 1.15(в)).

Наряду с исследованием поведения выходной интегральной мощности генератора на ВК от мощности внешнего воздействия было проведено изучение динамики мощности выходного СВЧ-излучения при изменении частоты внешнего гармонического сигнала. В рамках численного анализа было показано, что такая зависимость носит резонансный характер – достигает максимального значения при частоте  $f_{ext} = f_{VC}$  для разных значений тормозящей разности потенциалов между сетками диодного промежутка. Это говорит о том, что получение максимальных выходных мощностей в такой системе под внешним воздействием обусловлено повышением эффективности группировки электронного потока в области формирования виртуального катода за счет предварительной скоростной модуляции. То есть образование наиболее плотных электронных сгустков и достижение наибольшей величины сгруппированного тока пучка происходит при совпадении частоты внешнего воз-

действия с частотой собственных колебаний виртуального катода  $f_{ext} = f_{VC}$ . Расстройка по частоте приводит к разрушению структуры виртуального катода и перераспределению плотности пространственного заряда в пролетном промежутке, что приводит к уменьшению сгруппированного в области виртуального катода тока пучка, и, как следствие, падению уровня мощности выходного излучения. Стоит отметить, что выбранные и детально исследованные значения управляющего параметра  $\Delta\varphi = 0.46$  и  $\Delta\varphi = 0.47$  отвечают разным динамическим режимам колебаний выходного сигнала генератора (см. рис. 1.12).

### 1.3 Связанные генераторы на виртуальном катоде

Исследования, описанные в третьем разделе настоящей диссертационной работы, являются продолжением изучения влияния различных типов внешнего воздействия на динамику мощности выходного СВЧ-излучения низковольтного виркатора. Логичным продолжением проведенного исследования неавтономной динамики генератора на виртуальном катоде является рассмотрение цепочки связанных виркаторов. Теперь, в качестве управляющего сигнала выступает сигнал более сложной формы, нежели рассмотренные в предыдущем разделе простые гармонические колебания. Другими словами, глава 1.3 посвящена рассмотрению системы двух однонаправлено связанных низковольтных виркаторов и исследованию поведения выходной мощности системы при изменении управляющих параметров генераторов (раздел 1.3.1), а также исследованию вопроса о возможности установления в такой системе режимов синхронизации, в том числе обобщенной синхронизации и синхронизации временных масштабов (раздел 1.3.2).

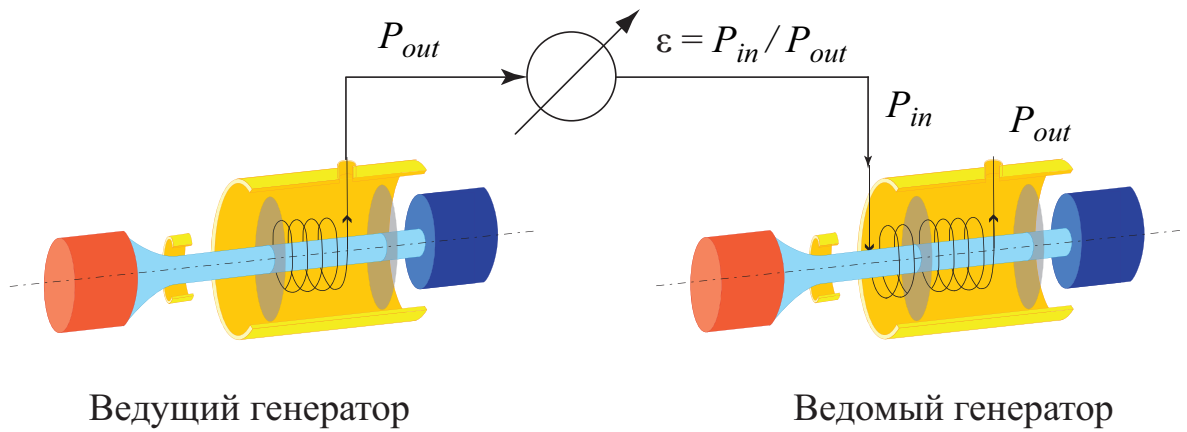


Рис. 1.17: Схема цепочки однонаправлено связанных низковольтных виркаторов

### 1.3.1 Цепочка генераторов на ВК

Цепочка однонаправленно связанных низковольтных виркаторов представляет собой систему связанных генераторов на ВК, в которой один генератор является ведущим, а другой ведомый. Физические величины, характеризующие ведущий виркатор далее будут отмечены индексом  $d$ , а ведомого индексом  $r$ . Схема данной системы представлена на рис. 1.17.

В такой системе связь между генераторами осуществляется с помощью канала связи, по которому СВЧ-сигнал с выходной спирали ведущего генератора подается на вход (модулирующую спираль) ведомого генератора. На рис. 1.18 представлена зависимость скорости пучка на входе в пространство дрейфа после прохождения им пространства модулятора от времени. Как видно, в данном случае влияние управляющего сигнала сильно отличается от воздействия на виркатор гармоническим сигналом: распределение скоростей частиц на входе в пространство дрейфа имеет более сложную форму, повторяющую форму сигнала ведущего генератора на виртуальном катоде.

В канале связи присутствует аттенюатор, который регулирует уровень мощности поступающего на вход ведомой системы внешнего сигнала. Таким образом, коэффициент связи в системе определяется как отношение мощно-



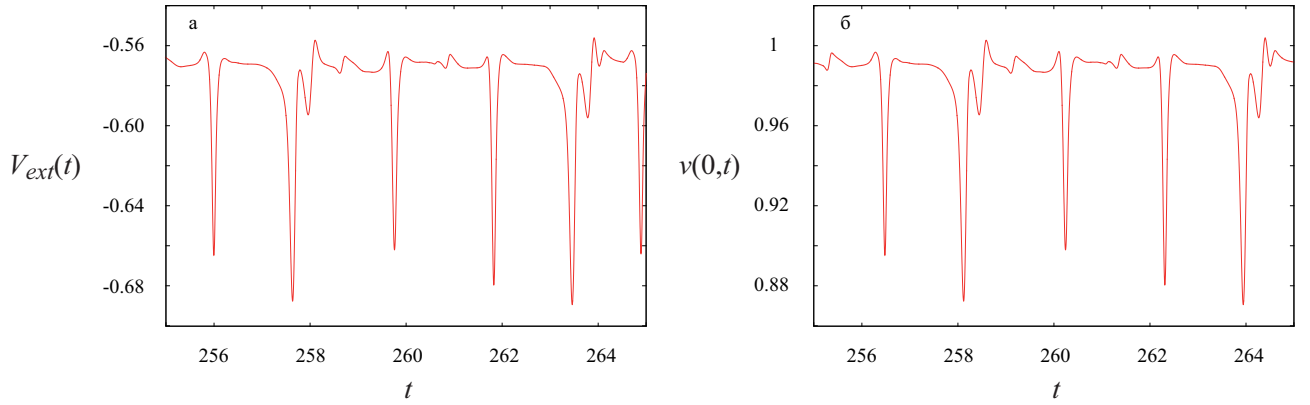


Рис. 1.18: Управляющий сигнал ведущего генератора (а) и распределение скоростей электронов на входе в систему под воздействием предварительной скоростной модуляции пучка выходным сигналом в ведомом низковольтном виркаторе. Параметры ведущего генератора –  $\Delta\varphi_d = 0.55$ ,  $\alpha_d = 0.9$ , коэффициент связи между генераторами –  $\varepsilon = 0.5$

стей входного сигнала ведомого генератора и выходного сигнала ведущего ( $\varepsilon = P_r^{in} / P_d^{out}$ ).

В ходе численного анализа было проведено изучение поведения цепочки в широком диапазоне управляющих параметров. В результате исследования были получены зависимости интегральной выходной мощности цепочки связанных виркаторов в зависимости от управляющих параметров, спектры колебаний выходного поля, а также используемые для анализа физических процессов в системе пространственно-временные диаграммы движения заряженных частиц в пучке.

Как показали исследования проведенные в рамках автономной модели, при выбранном значении безразмерного параметра Пирса ( $\alpha_d = \alpha_r = 0.9$ ), зона генерации рассматриваемой модели низковольтного генератора на виртуальном катоде лежит в области  $\Delta\varphi = 0.36 \div 0.75$  тормозящей разности потенциалов. Поэтому дальнейшие исследования не выходили за границы этой области.

Рассмотрим поведение интегральной выходной мощности цепочки генераторов в зависимости от управляющих параметров системы. На рис. 1.19 представлена двухпараметрическая зависимость мощности генерации от

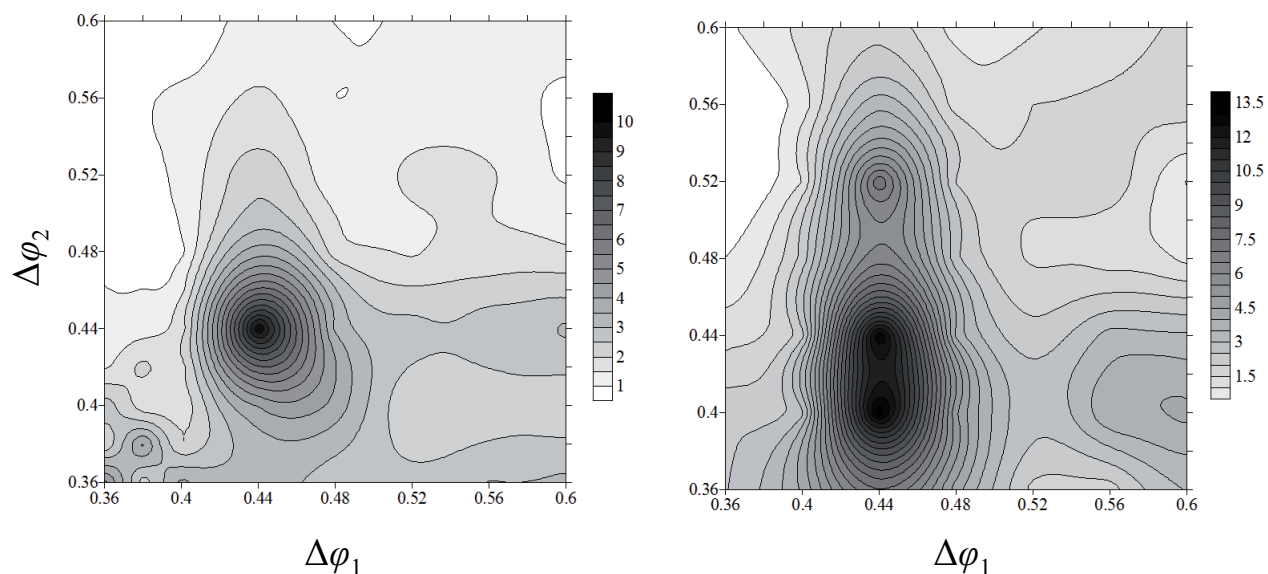


Рис. 1.19: Двухпараметрические зависимости поведения интегральной выходной цепочки при изменении тормозящей разности потенциалов ведущего и ведомого генераторов. Коэффициент связи между виркаторами –  $\varepsilon = 0.25$  (а),  $\varepsilon = 1$  (б)

управляющих параметров ведомого и ведущего генераторов при двух фиксированных величинах коэффициента связи  $\varepsilon = 0.25$  (а) и  $\varepsilon = 1.0$  (б). Видно, что на плоскости параметров наблюдается пик мощности, соответствующий паре  $\Delta\varphi_{d,r} = 0.44$ . Появление пика мощности при указанных параметрах объясняется тем, что при  $\Delta\varphi = 0.44$  низковольтный виркатор генерирует СВЧ излучение с максимальным уровнем выходной мощности 1.9. Таким образом, при настройке ведущего генератора на  $\Delta\varphi_d = 0.44$  достигается наиболее эффективная модуляция по скорости в ведомом генераторе. В рассмотренном ранее случае, когда в качестве управляющего сигнала был выбран гармонический сигнал, максимальная выходная мощность ведомой системы наблюдалась при настройке внешнего воздействия на частоту собственных колебаний виртуального катода. Нетрудно заметить, что аналогичный эффект возникает и при рассмотрении цепочки связанных генераторов – пик выходной мощности достигается при близкой настройке управляющих параметров взаимодействующих генераторов.

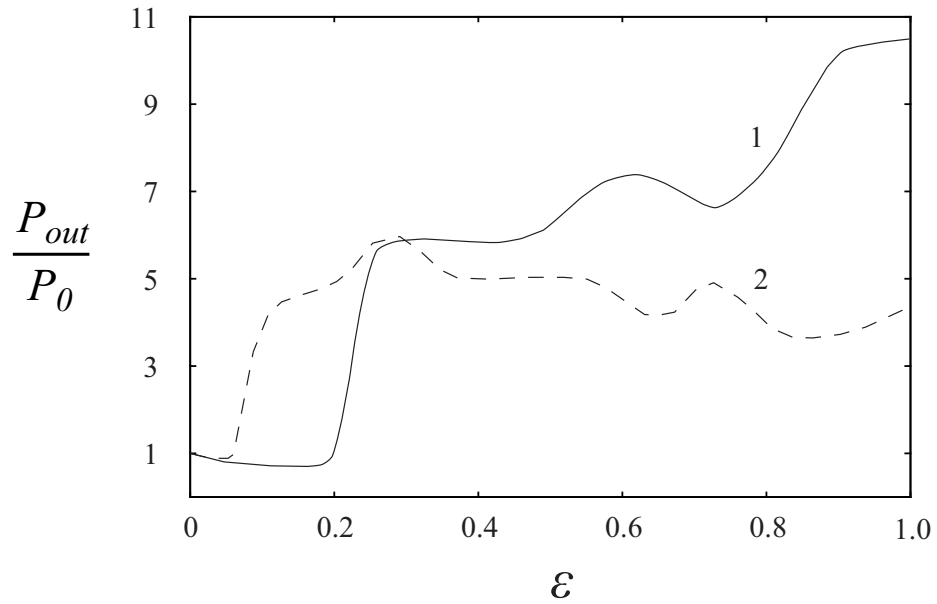


Рис. 1.20: Зависимость интегральной выходной мощности системы связанных низковольтных виркаторов от коэффициента связи, между взаимодействующими генераторами. Параметры генераторов –  $\Delta\varphi_d = 0.44$ ,  $\Delta\varphi_r = 0.44$ ,  $\alpha = 0.9$  (кривая 1),  $\Delta\varphi_d = 0.44$ ,  $\Delta\varphi_r = 0.4$ ,  $\alpha = 0.9$  (кривая 2)

При увеличении коэффициента связи максимальная выходная мощность цепочки наблюдается при меньших значениях разности потенциалов ведомого генератора. Это говорит о том, что рост параметра связи приводит к сильной модуляции электронного пучка при  $\Delta\varphi_d = 0.44$  и снижению эффективности группировки пучка в пространстве дрейфа, под действием приложенного внешнего воздействия. Смещение пика мощности в более низких значениях тормозящей разности потенциалов ведущего генератора свидетельствует о том, что в этой области управляющих параметров произошло увеличение эффективности взаимодействия пучка с внешним сигналом. Таким образом, двухпараметрический анализ позволяет определить оптимальные значения параметров для достижения максимальной выходной мощности цепочки генераторов.

На рис. 1.20 представлена зависимость мощности генерации в цепочке связанных виркаторов от коэффициента связи при фиксированных тормозящих потенциалах ведущего и ведомого генераторов. Величина  $\Delta\varphi_d = 0.44$

была выбрана из условия максимальной выходной мощности связанной системы (см. рисунок 1.19). Значения тормозящей разности потенциалов в ведомом генераторе  $\Delta\varphi_r$  выбирались таким образом, чтобы отразить поведение выходной мощности цепочки низковольтных виркаторов при идентичных параметрах взаимодействующих генераторов и при небольшой их расстройке. Для случая идентичных значений управляющих параметров ( $\Delta\varphi_r = 0.44$  и  $0.44$ ) на зависимости выходной мощности при определенном значении параметра связи наблюдается резкий скачок мощности, когда мощность генерации цепочки увеличивается по сравнению с мощностью автономного генератора примерно в 5-8 раз. Это соответствует возрастанию КПД системы примерно в 3-5 раз, что очень важно для практических приложений, учитывая типично низкий КПД генераторов на виртуальном катоде. Как видно из рис. 1.20, небольшая расстройка параметров ведущего и ведомого генераторов ( $\Delta\varphi_d = 0.44$  и  $\Delta\varphi_r = 0.4$ ) существенно не меняет характера изменения мощности выходного излучения цепочки. Однако, нетрудно заметить, что при небольшой расстройке управляющих параметров с ростом коэффициента связи интегральная выходная мощность ведомой системы выходит на насыщение, в отличие от идентичной настройки управляющих параметров, когда мощность генерации продолжает расти при увеличении коэффициента связи.

Исследование физических процессов с помощью построения и анализа пространственно-временных диаграмм движения крупных частиц в пространстве дрейфа при двух значениях коэффициента связи, до и после роста выходной мощности колебаний, (см. рис. 1.21) показало, что резкий рост мощности колебаний в системе происходит из-за качественного изменения динамики пучка в трубе дрейфа. При меньшем параметре связи (см. рис. 1.21(а)) виртуальный катод плохо сформирован, амплитуда его колебаний в

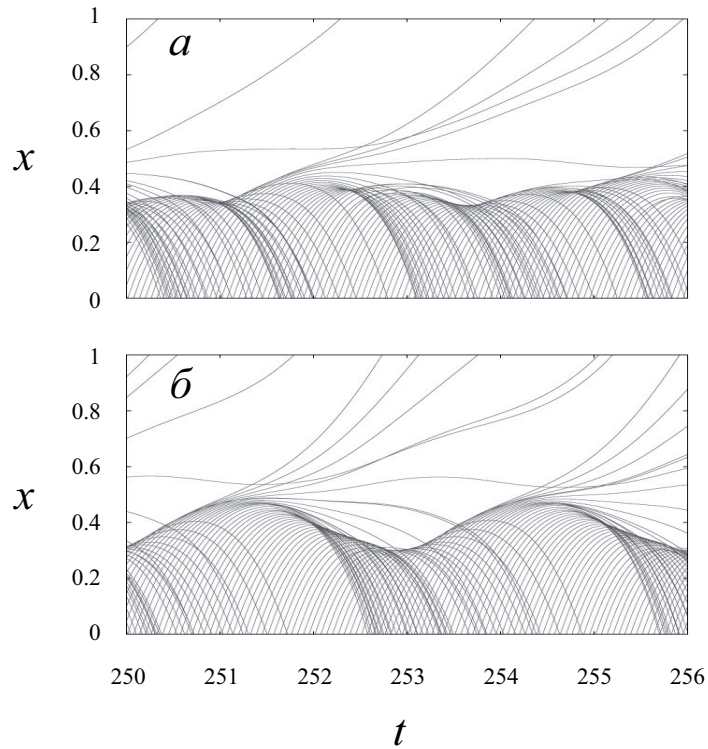


Рис. 1.21: Пространственно-временные диаграммы движения заряженных частиц в пролетном промежутке ведомого генератора. Параметры системы –  $\Delta\varphi_d = 0.44$ ,  $\Delta\varphi_r = 0.44$ ,  $\alpha = 0.9$ ,  $\varepsilon = 0.2025$  (а),  $\varepsilon = 0.25$  (б)

пространстве мала. Хорошо видно, что заряженные частицы отражаются в различных точках пространства, что связано перегруппировкой предварительно промодулированного внешним сигналом потока в области виртуального катода. Это приводит к формированию вторичных структур, вследствие чего выходной сигнал демонстрирует хаотические шумоподобные колебания с малой амплитудой. Отметим, что такой режим может быть интересен с точки зрения создания источника широкополосного шумоподобного СВЧ излучения. При больших значениях коэффициента связи (см. рис. 1.21(б)) в следствие более эффективной модуляции потока виртуальный катод оказывается хорошо сформирован и демонстрирует периодические колебания как во времени, так и в пространстве с большой амплитудой. Как следствие, такие колебания виртуального катода эффективно возбуждают отрезок спи-

ральной замедляющей системы и на выходе получается сигнал, близкий к периодическому, с высоким уровнем мощности.

### **1.3.2 Хаотическая синхронизация генераторов на виртуальном катоде**

Рассмотренное в предыдущем разделе поведение мощности также можно объяснить с позиций установления синхронизации: улучшение группировки электронного потока в пролетном промежутке является следствием повышения эффективности взаимодействия колебаний виртуального катода в электронном потоке с внешним воздействием.

#### **1.3.2.1 Синхронизация временных масштабов**

Рассмотрим установление режима хаотической синхронизации в цепочке одинаково направленных связанных низковольтных виркаторов. Поскольку частотный спектр исследуемых сигналов имеет сложный состав и ввести понятие фазы в большинстве случаев представляется затруднительным, при анализе синхронизации хаотических колебаний был использован подход, позволяющий диагностировать синхронное поведение в некотором диапазоне временных масштабов  $[s_1; s_2]$ . Такой тип синхронной динамики называется “синхронизация временных масштабов” [124–126]. При этом, как показано в проведенных ранее теоретических исследованиях, посвященных данному вопросу, что многие типы синхронизации, например обобщенная синхронизация и фазовая синхронизация, являются частными случаями синхронизации временных масштабов [127, 128]. Указанные временные масштабы вводятся в рассмотрение при помощи непрерывного вейвлетного преобразования [129]:

$$W(s, t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{s, t_0}^*(t) dt, \quad (1.26)$$

где  $x(t)$  – исследуемый временной ряд, подвергаемый вейвлетному преобразованию;  $\psi_{s,t_0}^*(t)$  – вейвлетная функция, получающаяся из материнского вейвлета  $\psi_0(t)$ :

$$\psi_{s,t_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_0\left(\frac{t-t_0}{s}\right) \quad (1.27)$$

В качестве материнского вейвлета согласно [127, 129] был выбран Морлет-вейвлет [129]

$$\psi_0(\eta) = (1/\sqrt[4]{\pi}) \exp(j\omega_0\eta) \exp(-\eta^2/2) \quad (1.28)$$

Параметр вейвлета выбран равным  $\omega_0 = 2\pi$ . При выбранном значении параметра вейвлета выполняется соотношение  $s = 1/f$  между временным масштабом  $s$  вейвлетного преобразования и частотой  $f$  Фурье-преобразования.

Временной масштаб  $s$  определяет ширину вейвлета  $\psi_{s,t_0}(t)$ ,  $t_0$  – временной сдвиг вейвлетной функции вдоль оси времени (“\*” означает комплексное сопряжение). Следует отметить, что в данном случае понятие временного масштаба, получаемого с помощью вейвлетного преобразования, является заменой понятия частоты Фурье-преобразования.

Вейвлетный спектр представляется в виде

$$W(s, t_0) = |W(s, t_0)| \exp(j\phi_s(t_0)) \quad (1.29)$$

и отражает динамику системы на каждом временном масштабе в каждый момент времени.

Применение непрерывного вейвлетного преобразования позволяет ввести фазу для каждого временного масштаба как  $\phi_s(t) = \arg[W(s, t)]$ . Поэтому становится возможным описание поведения каждого временного масштаба  $s$  помощью связанной с ним фазы  $\phi_s(t)$ .

Также для дальнейшего анализа удобно ввести распределение энергии вейвлетного спектра по временным масштабам

$$\langle E(s) \rangle = \int |W(s, t_0)|^2 dt \quad (1.30)$$

Проводя аналогию с фазовой синхронизацией, определим критерий установления синхронной динамики взаимодействующих хаотических сигналов с точки зрения синхронизации временных масштабов. Если существует некоторый диапазон временных масштабов  $[s_1; s_2]$  и при этом для каждого временного масштаба из указанного диапазона  $s \in [s_1; s_2]$  выполняется условие захвата фаз

$$|\phi_{s1}(t) - \phi_{s2}(t)| < const, \quad (1.31)$$

а также доля энергии вейвлетного преобразования, приходящегося на указанную область временных масштабов, отлична от нуля

$$E_{synch} = \int_{s1}^{s2} \langle E(s) \rangle ds > 0, \quad (1.32)$$

то временные масштабы  $s \in [s_1; s_2]$  являются синхронными. Следовательно хаотические колебания находятся в режиме синхронизации временных масштабов.

Рассмотрим динамику цепочки двух однонаправлено связанных низковольтных виркаторов при увеличении параметра связи между генераторами  $\varepsilon$ . Выберем параметры генераторов таким образом, чтобы динамические режимы колебаний выходного излучения ведущего и ведомого виркаторов различались – при  $\Delta\varphi_d = 0.4$  в системе реализуются слабохаотические колебания (ведущий генератор), а при  $\Delta\varphi_r = 0.6$  колебания виртуального катода являются периодическими (ведомый генератор). Спектры выходного излучения взаимодействующих генераторов представлены на рис. 1.22.

На рисунке 1.23 изображена зависимость границы синхронизации (ширины диапазона  $[s_1; s_2]$ ) от величины коэффициента связи между систе-



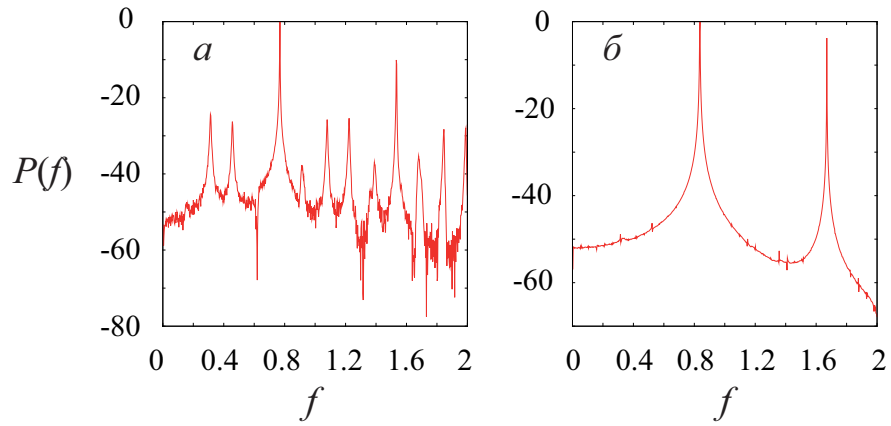


Рис. 1.22: Частотные спектры выходных колебаний взаимодействующих генераторов в автономном режиме –  $\Delta\varphi_d = 0.4$  (а),  $\Delta\varphi_r = 0.6$  (б),  $\alpha_{d,r} = 0.9$

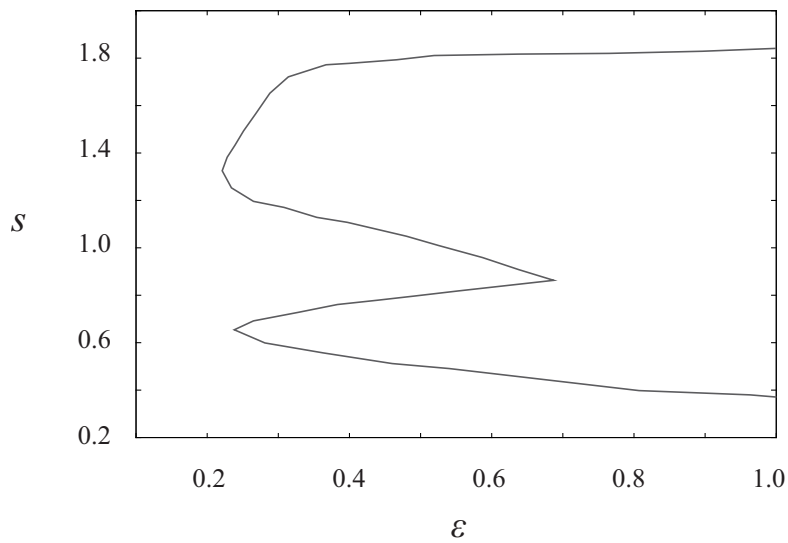


Рис. 1.23: Граница области синхронизации временных масштабов в цепочке однонаправленно связанных низковольтных инверторов. Параметры взаимодействующих генераторов –  $\Delta\varphi_d = 0.4$ ,  $\Delta\varphi_r = 0.6$ ,  $\alpha = 0.9$

мами. Видно, что в первую очередь синхронными становятся временные масштабы, соответствующие первым двум гармоникам спектра ведущего сигнала  $s_1 = 1.31$  и  $s_2 = 0.65$  ( $f_1 = 0.76$  и  $f_2 = 1.53$ , см. рис. 1.22). Затем, при увеличении внешнего воздействия появляются два диапазона временных масштабов, в которых динамика систем является синхронной. При  $\varepsilon \sim 0.7$  эти диапазоны сливаются в один, который покрывает большую часть спектра временных масштабов. Таким образом, можно сказать, что динамика ведомого и ведущего излучения становится полностью синхронной.

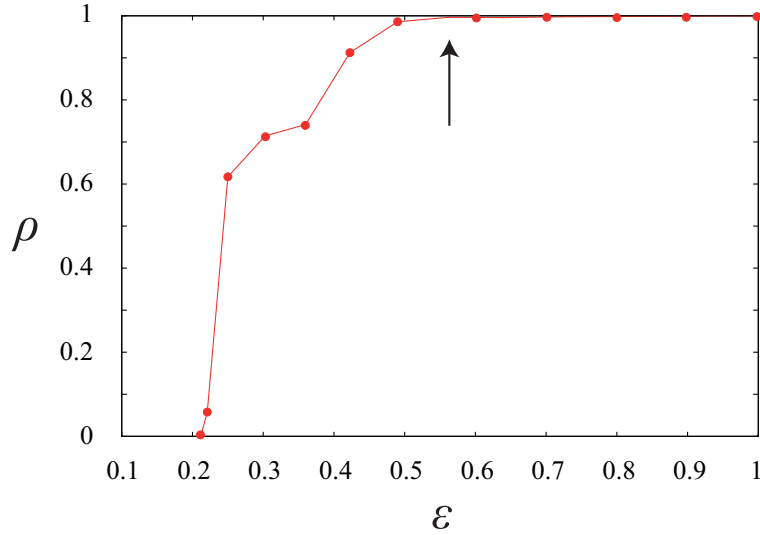


Рис. 1.24: Мера синхронизации временных масштабов. Параметры генераторов:  $\Delta\varphi_d = 0.4$ ,  $\Delta\varphi_d = 0.6$

Как видно из рис. 1.23, увеличение связи между системами приводит к появлению новых синхронных масштабов и расширению существующих областей синхронизованных временных масштабов. В качестве количественной меры ширины области синхронных временных масштабов можно ввести такую величину, как мера синхронизации  $\rho$ . Эта величина определяется как отношение энергии вейвлетного спектра, приходящейся на диапазон синхронных временных масштабов, к полной энергии вейвлетного спектра.

$$\rho = \frac{1}{E} \int_{s_1}^{s_2} \langle E(s) \rangle ds, \quad (1.33)$$

где  $E = \int_0^{+\infty} \langle E(s) \rangle ds$  – полная энергия вейвлетного спектра.

При таком определении меры синхронизации значение  $\rho = 0$  – соответствует несинхронной динамике взаимодействующих виркаторов, а  $\rho = 1$  – полной синхронизации. Диапазон значений  $\rho \in (0; 1)$  означает, что между взаимодействующими генераторами установился режим фазовой синхронизации. Таким образом, параметр позволяет определить не только степень взаимодействия связанных колебательных систем, но и диагностировать тот или иной тип синхронизации.

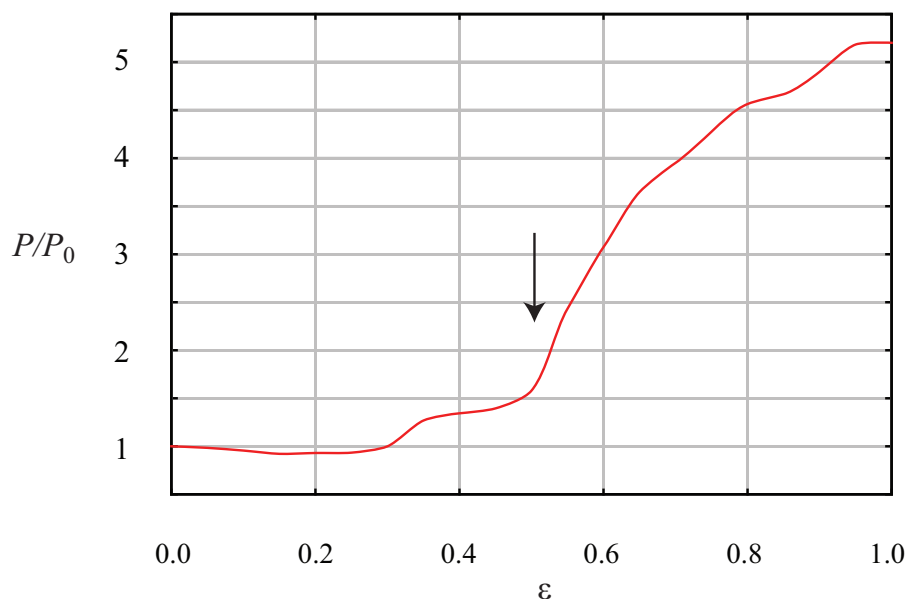


Рис. 1.25: Зависимость нормированной интегральной выходной мощности ведомого генератора на виртуальном катоде от параметра связи в цепочке:  $\Delta\varphi_d = 0.4$ ,  $\Delta\varphi_d = 0.6$ ,  $\alpha_{d,r} = 0.9$

На рисунке 1.24 изображена зависимость меры синхронизации от коэффициента связи между взаимодействующими низковольтными виркаторами. Эта иллюстрация поведения величины  $\rho$  дополняет рис. 1.23, на котором изображена граница области синхронизации временных масштабов. Видно, что при увеличении параметра  $\varepsilon$  цепочка связанных генераторов постепенно переходит от режима асинхронной динамики к режиму фазовой синхронизации ( $\varepsilon \sim 0.2$ ). Затем, увеличивая диапазон синхронных временных масштабов, система приходит к режиму полной синхронизации ( $\varepsilon \sim 0.65$ ).

Следует отметить, что значение коэффициента связи  $\varepsilon \sim 0.55$ , при котором происходит резкий скачок мощности выходного излучения, соответствует ситуации, когда энергия вейвлетного спектра, приходящаяся на синхронные временные масштабы, близка к полной энергии вейвлетного спектра, а мера синхронизации  $\rho$  становится близкой к единице (рисунок 1.25). Следовательно, можно сделать вывод о том, что установление в цепочке связанных низковольтных виркаторов режима синхронной динамики приводит к лучше-

му взаимодействию генераторов и последующему увеличению интегральной выходной мощности рассматриваемой системы.

### 1.3.2.2 Обобщенная синхронизация

На ряду с синхронизацией временных масштабов, интересно и важно как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения, выявление в рассматриваемой цепочке связанных автоколебательных систем пучково-плазменной природы упомянутой в начале раздела обобщенной синхронизации. Данный тип синхронного поведения означает установление некоторой функциональной зависимости  $F(\bullet)$  между состояниями ведущей  $x_d(t)$  и ведомой  $x_r(t)$  однонаправлено связанных систем после завершения переходного процесса длительностью  $T_{tr}$  [130–132]. При этом функциональная зависимость является такой, что  $x_r(t) = F(x_d(t))$ .

Наиболее удобным методом выявления данного типа синхронного поведения является метод “вспомогательной системы” [133]. Данный метод был введен и апробирован при анализе конечно-мерных систем, однако его легко можно обобщить и применять для анализа пространственно-распределенных систем. В рамках данного подхода в рассмотрение вводится еще одна “вспомогательная” система, идентичная ведомой, на которую также оказывает воздействие ведущий генератор. Вспомогательная система характеризуется состоянием  $x_a(t)$ , и начальные условия для нее выбираются отличными от начальных условий ведомой системы. Тогда, в отсутствии режима синхронизации состояния ведомой и вспомогательной систем принадлежат одному и тому же аттрактору, однако являются различными. Если же между взаимодействующими системами установилась обобщенная синхронизация, то в силу соотношений  $x_r(t) = F(x_d(t))$  и  $x_a(t) = F(x_d(t))$ , состояния ведомой и вспомогательной систем становятся идентичными  $x_r(t) \equiv x_a(t)$ . Таким обра-

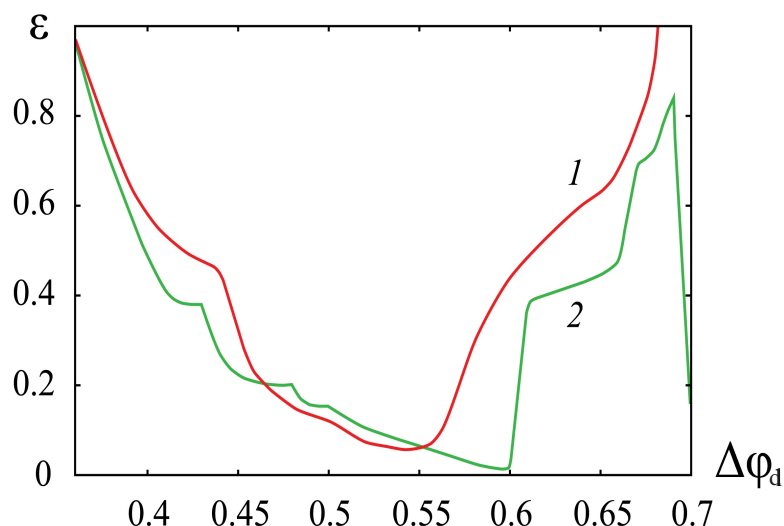


Рис. 1.26: Границы обобщенной синхронизации при изменении тормозящей разности потенциалов ведущего генератора. Ведомый низковольтный виркатор находится в режиме хаотической (кривая 1,  $\Delta\varphi_{r,a} = 0.54$ ) и периодической (кривая 2,  $\Delta\varphi_{r,a} = 0.6$ ) генерации

зом, идентичность состояний ведомой и вспомогательной систем после завершения переходного процесса является критерием установления обобщенной синхронизации.

В рамках рассматриваемой цепочки однонаправлено связанных низковольтных виркаторов для исследования вопроса об установлении синхронной динамики в системе параметры  $\Delta\varphi_{r,a}$  и  $\alpha_{r,a}$  ведомого и вспомогательного генераторов идентичны. Физические величины, характеризующие состояние вспомогательной системы, отмечаются индексом  $a$ . Управляющие параметры ведущего генератора ( $\Delta\varphi_d, \alpha_d$ ) при этом варьируются.

На рис. 1.26 представлена рассчитанная граница обобщенной синхронизации для двух параметров, соответствующих различным режимам колебаний выходного СВЧ-сигнала ведомого и вспомогательного генераторов ( $\Delta\varphi_{r,a} = 0.6, \alpha_{r,a} = 0.9$  – периодический режим,  $\Delta\varphi_{r,a} = 0.54, \alpha_{r,a} = 0.9$  – развитый хаотический режим). Кривые соответствуют минимальному пороговому значению параметра связи  $\varepsilon$  при котором происходит переход к синхронной динамике.

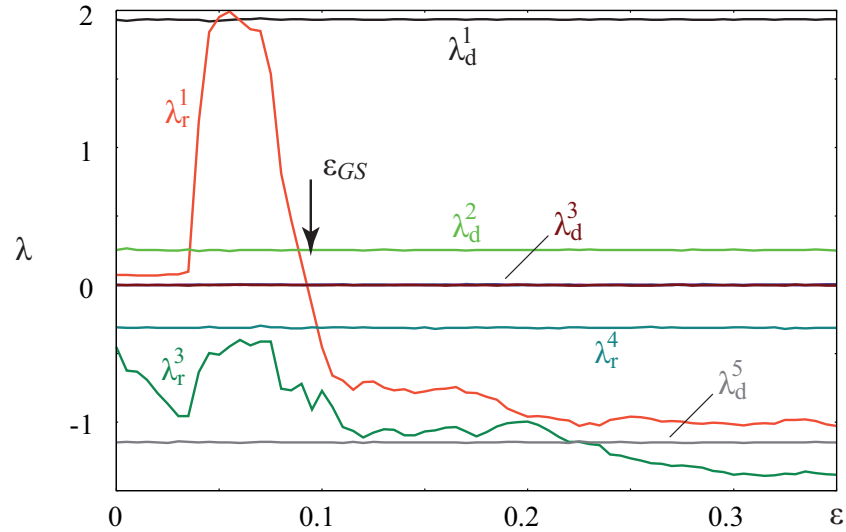


Рис. 1.27: Спектр восьми старших показателей Ляпунова для системы однонаправлено связанных генераторов на ВК. Спектру ведущего генератора соответствуют неизменяющиеся показатели Ляпунова, а спектру ведомого – изменяющиеся при варьировании параметра связи. Параметры взаимодействующих генераторов –  $\Delta\varphi_d = 0.5$  (развитые хаотические колебания),  $\Delta\varphi_r = 0.43$  (слабохаотические колебания),  $\alpha_d = \alpha_r = 0.9$ .

Поиск границы обобщенной синхронизации осуществлялся благодаря расчету спектра показателей Ляпунова для системы однонаправленно связанных генераторов на виртуальном катоде [92, 111]. Подход для расчета спектра показателей Ляпунова для пространственно-распределенных систем электронно-волновой и пучково-плазменной природы, содержащих интенсивные электронные потоки, моделируемые в рамках метода крупных частиц, был предложен в работе [89]. В силу независимости состояния ведущей системы от состояния ведомой спектр показателей Ляпунова цепочки однонаправленно автоколебательных систем с виртуальным катодом можно разделить на спектр показателей, отвечающих ведущей системе  $\lambda_d^n$ , которые не изменяются с ростом параметра связи, и спектр показателей, характеризующих динамику ведомой системы  $\lambda_r^n$ , которые изменяются с ростом параметра связи. Установление обобщенной синхронизации в системе однонаправленно связанных колебательных систем означает, что состояние ведомой системы определяется состоянием ведущей системы, не зависит от начальных усло-

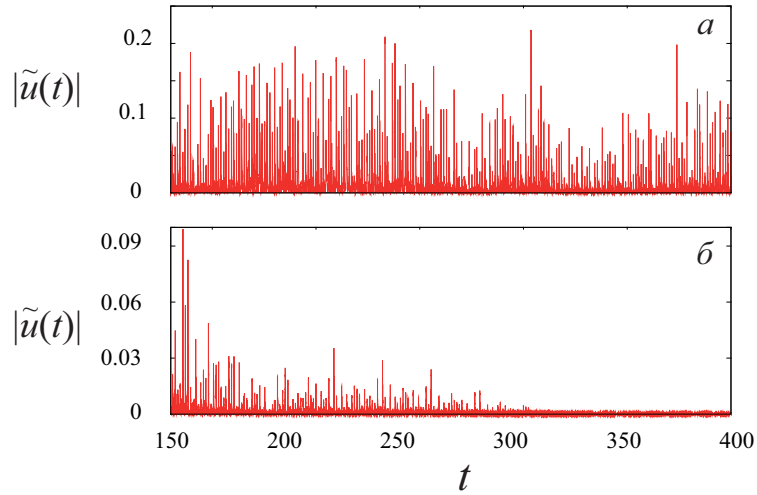


Рис. 1.28: Разность состояний между ведомой и вспомогательной системами  $\tilde{u}(t)$  в асинхронном (а,  $\varepsilon = 0.05$ ) режиме и режиме синхронизации (б,  $\varepsilon = 0.11$ ). Параметры генераторов –  $\Delta\varphi_d = 0.5$ ,  $\Delta\varphi_{r,a} = 0.43$ ,  $\alpha_{d,r,a} = 0.9$

вий и, следовательно, является устойчивым [132]. Таким образом, критерием перехода системы связанных осцилляторов в режиму обобщенной синхронизации является переход старшего показателя Ляпунова ведомой системы через нуль  $\lambda_r^1 < 0$ . На рисунке 1.27 приведен спектр из 8 старших показателей Ляпунова для системы однонаправленно связанных хаотических осцилляторов на виртуальном катоде. Видно, что система переходит к синхронизации при  $\varepsilon = 0.1$ , когда старший показатель ведомой системы становится меньше нуля.

Результаты, полученные в ходе расчета спектра показателей Ляпунова, подтверждаются при анализе обобщенной синхронизации с помощью метода вспомогательной системы. На рис. 1.28 представлено поведение разности состояний ведомого и вспомогательного генератора во времени до и после перехода системы к синхронизации. Видно, что в случае асинхронной динамики состояния взаимодействующих систем не являются идентичными и разность состояний ненулевая. При установлении режима обобщенной синхронизации после завершения переходного процесса величина  $\tilde{u}(t) = |U_r(t) - U_r(t)|^2$  стремится к нулю.

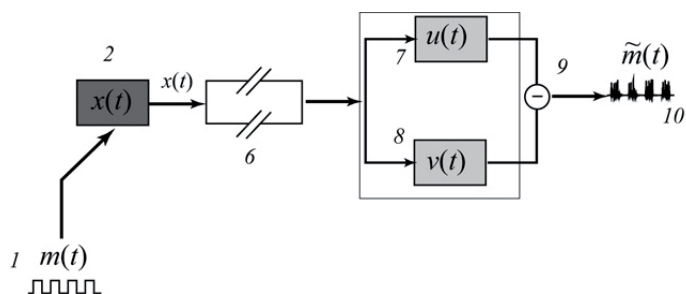


Рис. 1.29: Схема устройства, осуществляющего скрытую передачу информации

Видно, что переход к режиму обобщенной синхронизации в системе происходит при минимальной связи между взаимодействующими генераторами, если они настроены идентично или имеют небольшую расстройку управляющих параметров, а резкие скачки кривой связаны со сменой динамических режимов колебаний ВК.

### 1.3.2.3 Способ скрытой передачи данных на основе установления обобщенной синхронизации с использованием низковольтных виркаторов

Результаты, полученные в ходе исследования вопроса об установлении режима обобщенной синхронизации в цепочке однонаправленно связанных низковольтных виркаторов с помощью метода вспомогательной системы, легли в основу метода и схемы устройства для скрытой передачи информации на основе хаотического сигнала [80, 90]. На данный способ передачи информации был получен патент Российской Федерации [106].

Схема устройства представлена на рис. 1.29. В данной схеме передающий генератор, характеризующийся выходным сигналом  $U_d(t) = U_{out1}(t)$ , подбором управляющих параметров настроен на хаотический режим, который реализуется в диапазоне тормозящих потенциалов  $\Delta\varphi_d = (0.48 \div 0.58)$ .

Величина безразмерного тока пучка была выбрана постоянной и равной  $\alpha = 0.9$ . Величина тормозящего потенциала  $\Delta\varphi_d$  модулируется полезным цифровым сигналом следующим образом. Если в заданный интервал време-



ни передается бинарный бит 1, тогда  $\Delta\varphi_d = 0.52$  на протяжении всего этого интервала. При передаче бинарного бита 0 параметр  $\Delta\varphi_d$  принимает значение  $\Delta\varphi_d = 0.54$ . Принимающее устройство представляет собой совокупность двух идентичных ведомых генераторов, второго и третьего. Тогда - сигнал второго генератора,  $U_r(t) = U_{out2}(t)$ , а  $U_a(t) = U_{out3}(t)$  является сигналом третьего генератора (см. рис. 1.29). Виркаторы, составляющие принимающее устройство, настроены в автономном случае (без воздействия внешнего сигнала) на работу в периодическом режиме с помощью выбора параметров  $\alpha_{r,a} = 0.9$  и  $\Delta\varphi_{r,a} = 0.6$ . Сила связи между передающим и принимающим генераторами характеризуется параметром  $\varepsilon = 0.1$ . В этом случае режим обобщенной синхронизации в системе однонаправлено связанных низковольтных виркаторов имеет место при  $\Delta\varphi_d = 0.54$ , в то время как для  $\Delta\varphi_d = 0.52$  обобщенная синхронизация не наблюдается. Вычитающее устройство выполняет операцию  $(U_r(t) - U_a(t))^2$ . Тогда после прохождения через него, согласно методу вспомогательной системы, должно наблюдаться отсутствие колебаний для  $\Delta\varphi_d = 0.54$  и наличие хаотических колебаний для  $\Delta\varphi_d = 0.52$ . Восстановленный сигнал будет представлять собой последовательность областей с различными типами поведения. В качестве информационного сигнала  $m(t)$  выберем последовательность бинарных битов 0/1, представленную на рис. 1.30(а).

Характеристики передающего хаотического генератора будем модулировать простой последовательностью бинарных битов 0/1. На рис. 1.30(б) приведен фрагмент сигнала  $s(t)$ , передаваемого по каналу связи. В передаваемом сигнале  $s(t)$  не видно ни следов модуляции управляющего параметра  $\Delta\varphi_d$  полезным сигналом  $m(t)$ , ни каких-либо других признаков наличия исходного скрытого информационного сообщения. Рис. 1.30(в) иллюстрирует

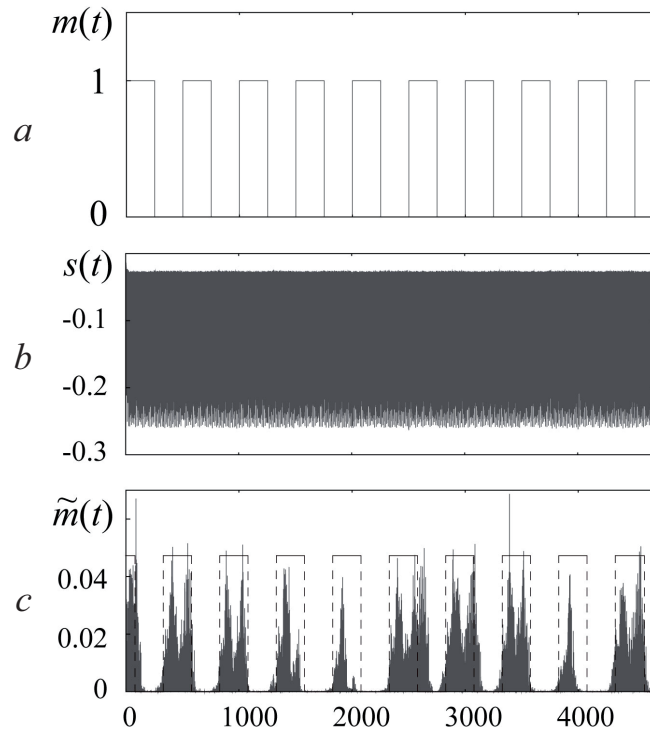


Рис. 1.30: Временные реализации сигналов в устройстве для скрытой передачи информации. Информационный сигнал –  $a$ ; сигнал, передаваемый по каналу связи –  $b$ ; восстановленный сигнал –  $c$

восстановленный сигнал  $m(t)$ . Нетрудно видеть, что полезный цифровой сигнал может быть легко детектирован.

## 1.4 Выводы

В рамках первой главы диссертационного исследования были изучены вопросы увеличения мощности выходного СВЧ излучения при воздействии внешним сигналом на генератор на виртуальном катоде в рамках одномерной модели нерелятивистского электронного пучка в системе с дополнительным торможением потока (низковольтный виркатор). Возможность роста выходной мощности за счет предварительной скоростной модуляции потока на частоте внешнего гармонического сигнала была выявлена в простой стационарной теоретической модели. Для проведения более детального исследования была разработана одномерная численная модель, основанная на методе крупных частиц. Данный подход был основан на самосогласованном ре-

шении нерелятивистских уравнений движения крупных частиц и решении уравнения Пуассона для определения значений электрического поля в узлах пространственной сетки. Результаты исследования неавтономной динамики нерелятивистского виркатора, полученные в рамках одномерного численного моделирования, хорошо согласуются с результатами стационарной теоретической модели. При этом существует качественное расхождение результатов при больших значениях глубины модуляции пучка, которое объясняется тем, что простая теоретическая модель не учитывает многих особенностей динамики пучка, которые позволяет описать численная модель. Увеличение мощности также было обнаружено и при однонаправленном воздействии ведущего генератора на виртуальном катоде на ведомый генератор (цепочка низковольтных виркаторов). При этом, по аналогии со случаем воздействия внешним сигналом наиболее эффективное увеличение мощности наблюдается при небольшой расстройке управляющих параметров взаимодействующих систем.

Выявленная в ходе численного моделирования возможность увеличения выходной мощности была объяснена также с позиций установления режима синхронизации временных масштабов – показано, что рост мощности при взаимодействии однонаправленно связанных генераторов на виртуальном катоде возникает, когда большая часть временных масштабов взаимодействующих генераторов становится синхронной. Помимо синхронизации временных масштабов была выявлена возможность установления ещё одного важного и интересного типа хаотической синхронизации – обобщенной синхронизации. В ходе исследования данного вопроса была изучена прикладная значимость проведенного исследования: было показано, что генераторы на виртуальном катоде могут выступать в качестве активных модулей в схемах скрытой передачи данных, основанной на явлении обобщенной синхронизации.

## Глава 2

### **Анализ процессов в неавтономном генераторе на виртуальном катоде в рамках трехмерного моделирования. Сравнение с экспериментом [93, 105]**

#### **2.1 Введение**

В предыдущей главе были представлены результаты анализа неавтономного поведения электронного пучка в режиме формирования виртуального катода, проведенного на основе одномерной самосогласованной модели взаимодействия пучка с электромагнитным полем в низковольтном виркаторе. Полученные результаты позволили качественно описать эффекты, возникающие в интенсивных нерелятивистских электронных потоках с виртуальным катодом, сфокусированных внешним магнитным полем, находящихся под влиянием внешнего сигнала. При этом, для полного понимания процессов, протекающих в потоках заряженных частиц со сверхкритическими токами, необходимо проведение полномасштабного численного моделирования в рамках полностью электромагнитной модели. Использование трехмерной полностью электромагнитной модели пучка позволяет получить результаты, максимально приближенные к результатам, получаемым в ходе исследований на экспериментальной установке, в силу ряда причин. В частности, рассмотрение трехмерное моделирование дает возможность учитывать не только аксиаль-

ное движение заряда вдоль оси  $z$ , но и движение частиц поперечном оси  $z$  направлении, что является важным при анализе пучков с виртуальным катодом [7, 8, 87]. Также немаловажным является возможность учесть геометрию конкретного СВЧ прибора при численном анализе, которая может принципиальным образом влиять на динамику потока в рассматриваемой электронно-волновой системе СВЧ диапазона.

Проведение эффективного трехмерного полностью электромагнитного моделирования пучков заряженных частиц, взаимодействующих с электромагнитными полями, возможно проводить при помощи коммерческого программного продукта CST Particle Studio (CST PS). Моделирование процессов в такой системе основано на известном и хорошо апробированном в электронике методе “крупных частиц”. Моделирование собственных полей электронного пучка и электродинамических систем в данной программе осуществляется с помощью решения уравнений Максвелла в трех пространственных измерениях. Главной особенностью CST PS является возможность проведения эффективного численного полностью электромагнитного трехмерного моделирования электронных приборов с высокой степенью точности и достоверности. Методы, используемые в данном программном пакете, позволяют рассматривать его как мощный и универсальный инструмент, дополняющий и в некоторой степени заменяющий экспериментальные исследования. В рамках научных исследований систем электронно-волновой природы, благодаря уникальным характеристикам CST Particle Studio, с его помощью возможно проведение моделирования как отдельных технологических узлов СВЧ устройств (электронно-оптические системы формирования электронных потоков, резонансных и широкополосных электродинамических систем, коллекторных систем); упрощенных модельных систем, позволяющих моделировать и изучать работу СВЧ устройств в случаях, не требующих детализации кон-

струкции прибора, для исследования транспортировки электронных пучков, физических процессов, происходящих в потоках при заданных условиях; а также СВЧ устройств в целом. Применение пакета CST Particle Studio к решению поставленных в рамках данной диссертационной работы задач, а также большой опыт его использования у соискателя, позволят детально изучить физические процессы в исследуемых системах, провести их оптимизацию в условиях, приближенных к реальному эксперименту.

В данной главе представлены результаты создания и исследования численной модели генератора на виртуальном катоде с возможностью ввода внешнего сигнала в лицензионной программной среде CST PS. При создании численной модели в CST PS в основу была положена схема экспериментального макета низковольтного виркатора, созданного под руководством д.т.н., профессор Ю.А. Калинина. Раздел 2 второй главы посвящен описанию разработанной трехмерной численной модели электронного потока в низковольтной виркаторной системе со спиральным вводом и выводом электромагнитных сигналов. В подразделе 2.2.1 обсуждаются основные особенности моделирования конструкции макета низковольтного виркатора, а также представлены основные результаты оптимизации геометрических параметров системы. В подразделе 2.2.2 представлены результаты численного моделирования динамики электронного пучка в низковольтной системе в автономном режиме, в частности, приведены характеристики выходного сигнала, фазовые портреты пучка, а также интегральные характеристики генерации (частота, мощность). В последнем разделе 2.3 данной главы рассмотрена возможность ввода внешнего сигнала в систему, описаны изменения конструкции прибора для работы в неавтономном режиме и результаты численного анализа (подраздел 2.3.1), а также проведено детальное сравнение результатов численного моделирования с данными, полученными в ходе

экспериментального исследования неавтономного низковольтного виркатора (подраздел 2.3.2).

## **2.2 Трехмерная полностью электромагнитная модель автономного низковольтного виркатора**

Данный раздел посвящен рассмотрению основных особенностей трехмерной электромагнитной модели генератора на виртуальном катоде. В отличие от рассмотренной ранее в главе 1 одномерной модели пучка, здесь принципиальную роль в формировании нестационарного виртуального катода играет выбор геометрических параметров пушки и пространства дрейфа виркатора. Помимо этого трехмерная полностью электромагнитная модель пучка позволяет учесть влияние собственных и внешних магнитных полей на динамику пучка и образование в пространстве дрейфа нестационарного виртуального катода.

### **2.2.1 Трехмерное моделирование конструкции и оптимизация геометрических параметров генератора на виртуальном катоде**

Основные геометрические параметры выбраны в соответствии с экспериментальным макетом [54, 118]. Исследуемая в данной главе модель генератора на виртуальном катоде, построенная в программном комплексе CST PS, представлена на рисунке 2.1 (фотография экспериментального макета показана на рисунке 1.1 (б)). Данную схему можно условно разделить на две части: электронную пушку, представляющую собой трубу радиусом  $r_1 = 8.5\text{мм}$  с расположенным в ней катодом и источником питания, а также пространство дрейфа: труба радиусом  $r_2 = 15\text{мм}$  с электродинамической структурой, нагруженной на коаксиальный волновод, с помощью которой осуществляется

вывод мощности СВЧ колебаний виртуального катода. Электронная пушка отделена от пространства дрейфа анодной сеткой. Стоит отметить, что в рамках рассматриваемой идеализированной модели пространство дрейфа и пушечная часть заполнены идеальным вакуумом, а стенки, сетки и прочие поверхности являются идеальными проводниками.

Рассмотрим вначале подробнее пушечную часть. Мы рассматриваем простейшую двухэлектродную пушку без управляющей сетки. Электронный поток инжектируется при помощи термоэмиссии с катода цилиндрической формы радиусом  $r_c = 7.7$  мм, при этом эмитирующая поверхность является вогнутой для улучшения фокусировки пучка и создания более плотного сгустка в пространстве дрейфа. В итоге это способствует лучшему формированию виртуального катода в системе. Радиус кривизны вогнутой эмитирующей поверхности  $R = 29.75$  мм. В ходе проведения численного эксперимента ток пучка варьировался в диапазоне  $I_0 = 0.6 \div 1.0$  А. Источник питания создавал ускоряющую разность потенциалов  $V_0 = 800$  В между катодом и корпусом. Видно, что анодная сетка обладает потенциалом корпуса, поскольку они соединены, следовательно ускоряющая разность потенциалов  $V_0$  создается и между катодом и анодом. Расстояние между катодом и анодной сеткой  $d = 2$  мм выбрано небольшим для того, чтобы ток пучка из пушки не ограничивался пространственным зарядом в соответствии с законом Чайлда-Ленгмюра [8]. Также маленькое расстояние между катодом и анодом снижает риск развития неустойчивости и образования виртуального катода непосредственно в пушечной части.

Выбор величин радиусов труб пушечной части и пространства дрейфа обусловлен тем, что эффективная генерация достигается при образовании виртуального катода в пространстве дрейфа. Как известно, если рассматриваемый пучок является сплошным, имеет конечный радиус  $r_b$  и распространя-



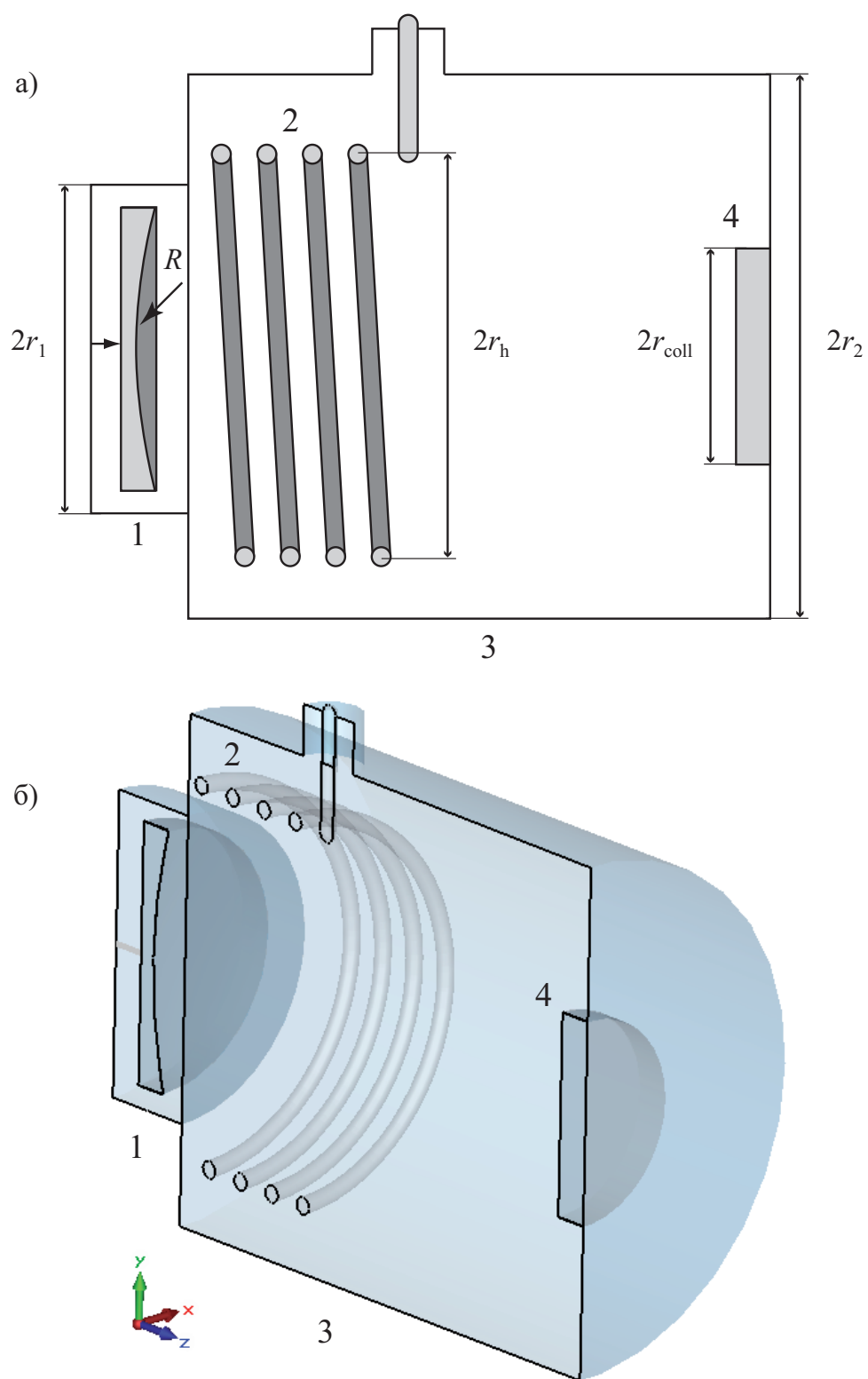


Рис. 2.1: Схема исследуемого СВЧ прибора (а) и сечение его трехмерной модели в среде CST PS (б). Здесь: 1 – электронная пушка; 2 – выходная спиральная система; 3 – пространство дрейфа; 4 – коллектор;  $r_1$  – радиус катода;  $R$  – радиус кривизны катода;  $r_h$  – радиус спиральной выходной системы;  $r_{coll}$  – радиус коллектора.

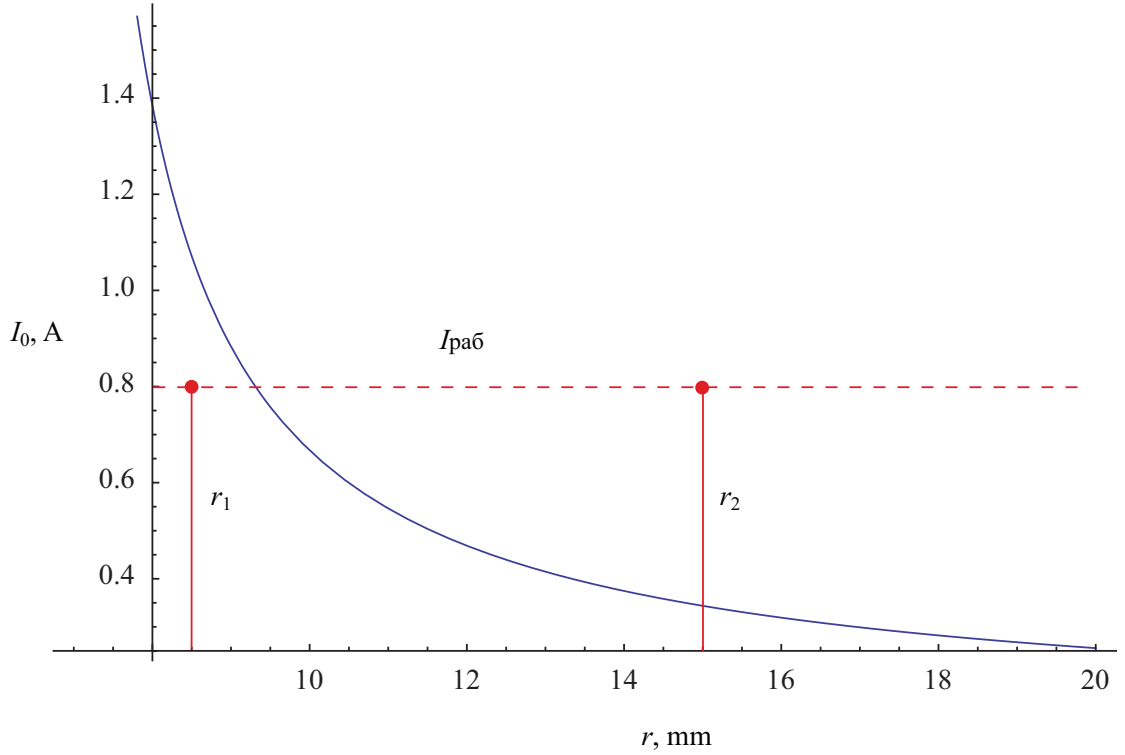


Рис. 2.2: Зависимость критического тока пучка от радиуса трубы дрейфа. Красной пунктирной линией обозначен рабочий ток  $I_{\text{раб}} = 0.8\text{A}$ .

ется в трубе радиусом  $r$ , то зависимость критического тока пучка от радиуса трубы определяется соотношением [11]:

$$I_{cr}(r) = 17.03 \frac{(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{2 \ln(r/r_b)} \text{кА}, \quad (2.1)$$

где  $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  – релятивистский фактор. Кривая, определяемая уравнением (2.1), представлена на рисунке 2.2: выше этой кривой ток является надкритическим, а ниже – докритическим. Исходя из этого, значения радиусов труб электронной пушки и пространства дрейфа выбирались таким образом, чтобы рабочий ток  $I_{\text{раб}} = 0.8\text{ A}$  (показан пунктиром) не был критическим для пушечной части с радиусом  $r_1$  и становился надкритическим уже в пространстве дрейфа с радиусом  $r_2$ .

Как было сказано ранее, трехмерная электродинамическая модель позволяет проводить анализ движения заряженных не только в вдоль оси  $z$ , но и в перпендикулярных ей направлениях. В отсутствии магнитного по-

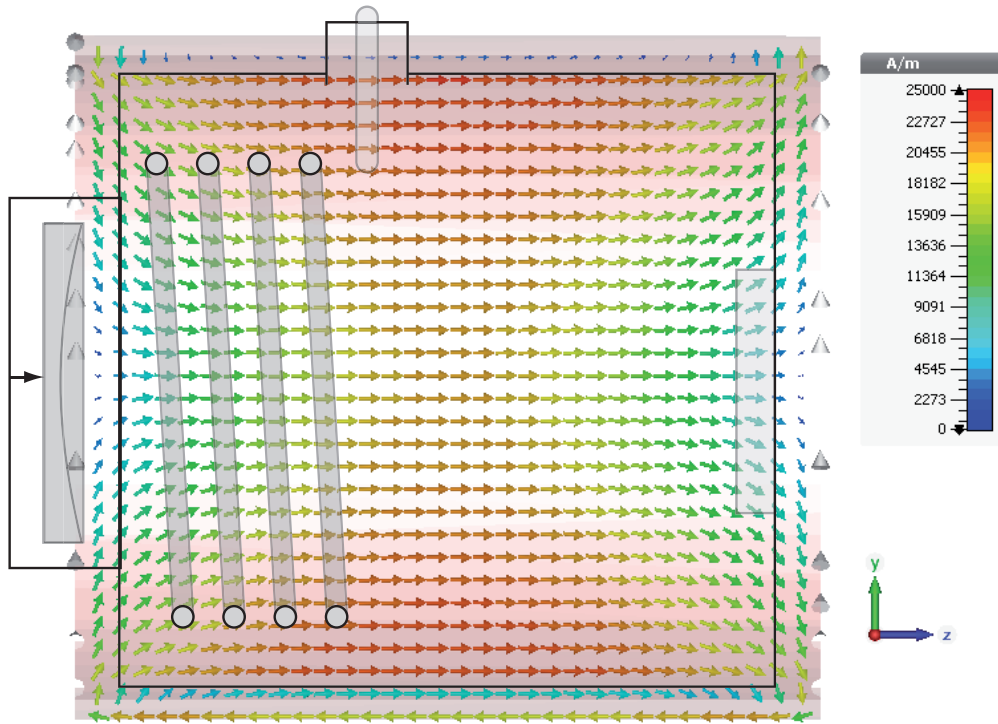


Рис. 2.3: Распределение  $z$ -компоненты напряженности приложенного внешнего магнитного поля в пространстве дрейфа электронного потока. Максимальное значение, которое принимает магнитное поле в пространстве дрейфа, равняется 0.25Тл.

ля траектории заряженных частиц расходятся в радиальном направлении, что вызвано силами пространственного заряда, вследствие чего наблюдается уменьшение плотности пространственного заряда. Для формирования более плотного электронного сгустка в области образования виртуального катода осуществляется фокусировка пучка внешним магнитным полем соленоида. Распределение поля, также рассчитанное в программе CST PS, представлено на рисунке 2.3. Видно, что направление силовых линий и величина напряженности магнитного поля являются неоднородными в пространстве, однако в основной части пространства дрейфа магнитное поле направлено вдоль оси  $z$ . Это позволяет эффективно группировать заряженные частицы в области виртуального катода и удерживать радиус пучка примерно постоянным вдоль пространства дрейфа.

В рамках трехмерной электромагнитной модели пучка в генераторе на виртуальном катоде показано насколько эффективно электронный поток

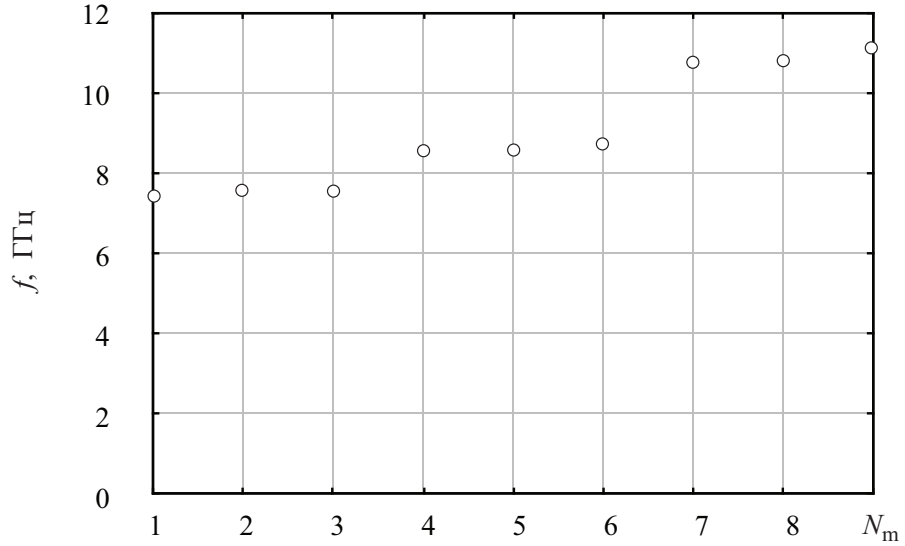


Рис. 2.4: Зависимость частоты собственных мод колебаний электромагнитного поля в пространстве дрейфа, представляющем собой цилиндрический резонатор, от номера моды.

взаимодействует с электромагнитным полем в цилиндрическом резонаторе, образованном трубой дрейфа, и определяется ли частота генерации в данном приборе геометрией пространства дрейфа. Оценим частоту колебаний виртуального катода при помощи расчета плазменной частоты пучка. Согласно соотношению

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e}} = \sqrt{\frac{\eta I_0}{\varepsilon_0 v \pi r_b^2}}, \quad (2.2)$$

где  $n_e$  – концентрация заряда электронов, а  $r_b$  – радиус пучка в области формирования виртуального катода, плазменная частота пропорциональна корню квадратному из тока пучка. В (2.2) скорость заряженных частиц  $v = \sqrt{2\eta V_0}$ , где  $V_0$  – ускоряющее напряжение. При выбранном значении рабочего тока пучка  $I_0 = 0.8A$ , плазменная частота равна 0.96 ГГц. В свою очередь, расчет собственных мод цилиндрического резонатора пространства дрейфа с помощью средств программного продукта CST PS, показал, что минимальная частота колебаний собственных мод колебаний электромагнитного поля равна 7.43 ГГц. Это означает, что для данной конфигурации пучка и геометрии пространства дрейфа колебания виртуального катода не воз-

буждают собственных мод колебаний электромагнитного поля в резонаторе. Таким образом, с одной стороны пучок эффективно не взаимодействует с собственными модами колебаний поля в пространстве дрейфа, с другой стороны частота колебаний виртуального катода не определяется геометрией цилиндрического резонатора и связана лишь с плазменной частотой пучка. Последнее определяет тот факт, что частота колебаний виртуального катода легко варьируется при изменении величины тока пучка  $I_0$  или ускоряющего напряжения  $V_0$ .

Разработка трехмерной численной модели интенсивного электронного потока в генераторе на виртуальном катоде завершается оптимизацией геометрических параметров отрезка спиральной электродинамической выходной структуры, используемой для вывода мощности из виркатора. Для этого воспользуемся приближением, в рамках которого выходная спираль можно рассматривать как спирально-проводящий цилиндр, и проведем аналитические оценки сопротивления связи в данной системе. В соответствии с моделью спирально-проводящего цилиндра сопротивление связи между пучком и спиральной электродинамической системой определяется соотношением [134]:

$$R_c = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{1}{\pi (kr_h \cot \phi)} \frac{\cot \phi}{\left(1 + \frac{1}{\cot^2 \phi} \left(\frac{kr_h \cot \phi}{\gamma r_h}\right)^2\right)^{3/2}} F_0(\gamma r_h). \quad (2.3)$$

Здесь  $k$  – волновое число замедленной волны в спирали,  $\beta$  – волновое число вдоль оси  $z$ , волновое число  $\gamma = \sqrt{\beta^2 - k^2}$ ,  $\phi$  – угол намотки спирали, а функция  $F_0$  представляется в виде:

$$F_0(x) = \frac{I_0(x)}{K_0(x)} \left( \frac{I_1(x)}{I_0(x)} - \frac{I_0(x)}{I_1(x)} + \frac{K_0(x)}{K_1(x)} - \frac{K_1(x)}{K_0(x)} + \frac{4}{x} \right), \quad (2.4)$$

где  $I_n(x)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода, а  $K_n(x)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода.

Результаты приближенных расчетов зависимости сопротивления связи  $R_c$  от длины спирали  $h$  приведены на рисунке 2.5(а). В соответствии с полу-

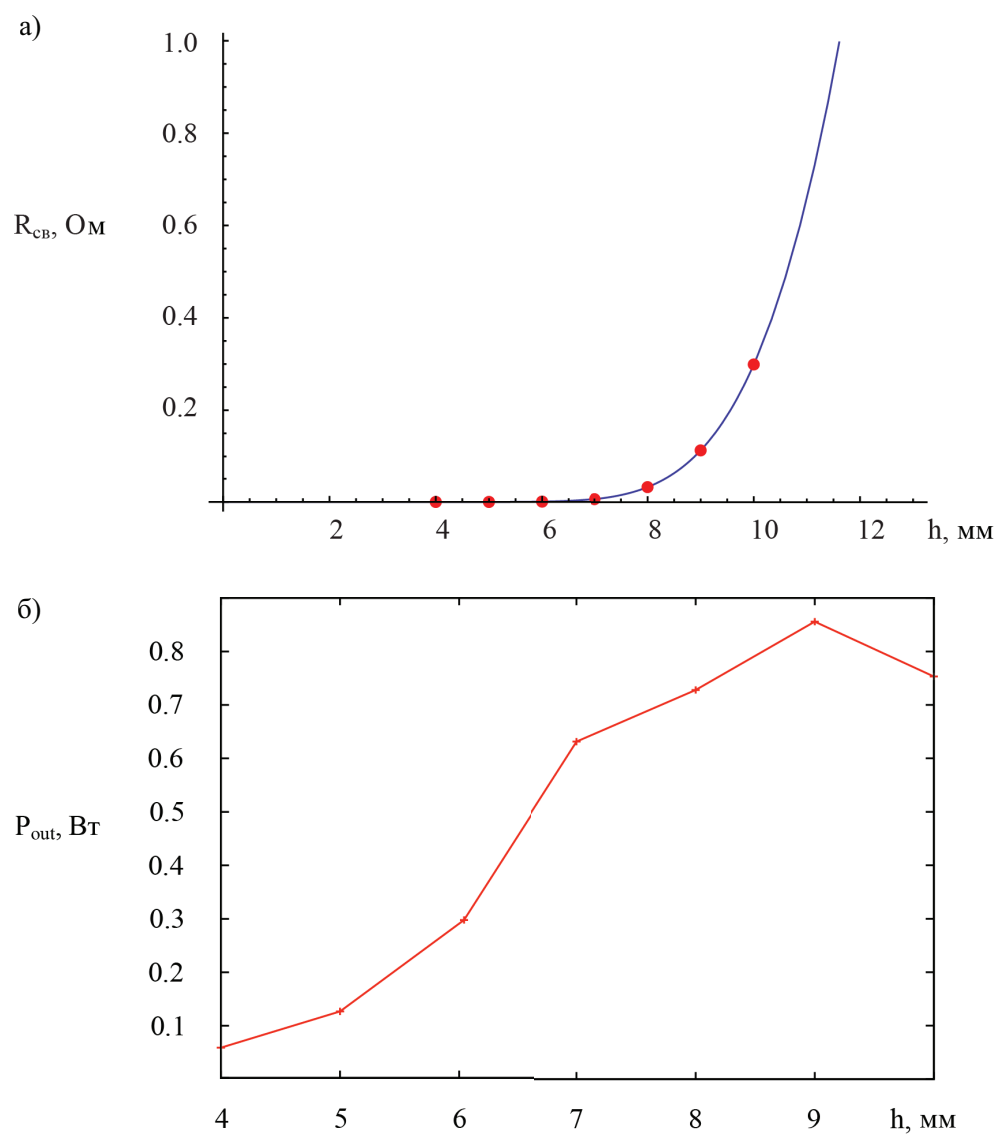


Рис. 2.5: Зависимость сопротивления связи от длины спиральной системы при фиксированном количестве витков  $n_h = 4$ , полученная аналитически (а), и зависимость интегральной мощности выходного сигнала, рассчитанная при численном моделировании (б).

ченными результатами, сопротивление связи испытывает экспоненциальный рост при увеличении длины спирали. Аналогичный результат был получен в ходе численного моделирования в рамках трехмерной модели пучка в генераторе на виртуальном катоде. В рамках численного моделирования проводился анализ поведения интегральной мощности выходного сигнала, т.к. величина мощности пропорциональна сопротивлению связи пучка с выходной электродинамической структурой. Зависимость интегральной мощности выходного сигнала приведена на рисунке 2.5(б). Видно, что мощность на выходе генератора на виртуальном катоде испытывает рост, аналогичный росту аналитической зависимости сопротивления связи, на участке  $h = 4 \div 9$  мм. Стоит заметить, что при  $h = 9$  мм выходная мощность достигает максимального значения, а затем испытывает спад. Дальнейшее уменьшение мощности связано с тем, что при  $h > 9$  мм мы выходим за рамки приближения спирально-проводящего цилиндра и результаты, полученные аналитически, перестают корректно описывать поведение сопротивления связи спиральной системы с пучком. Таким образом, найденное оптимальное значение длины спирали для наиболее эффективного вывода мощности колебаний виртуального катода –  $h = 9$  мм. Помимо этого, была проведена оптимизация радиуса спиральной системы – как было показано в рамках аналитического рассмотрения модели спирально-проводящего цилиндра, максимальное значение сопротивления связи достигается при  $r_h = r_b$  и убывает с ростом радиуса спирали. Аналогичный результат был получен и ходе трехмерного моделирование с помощью программы CST PS.

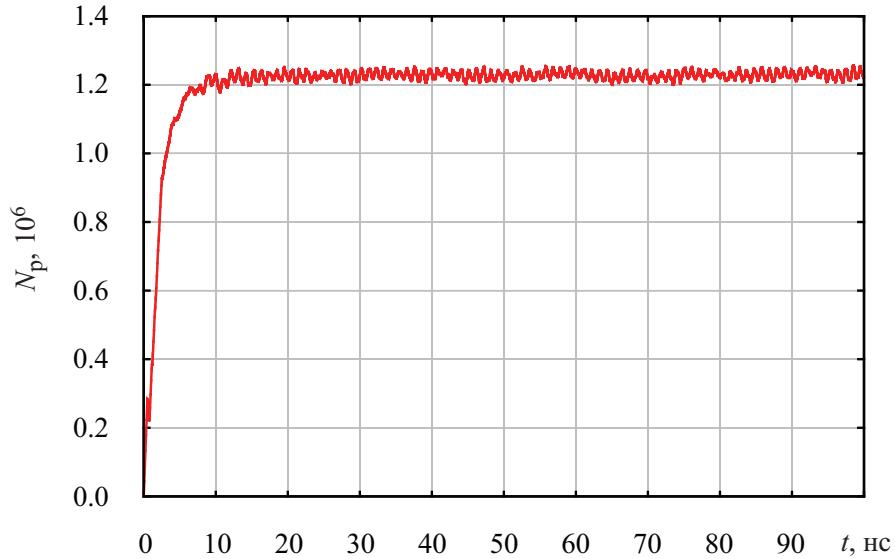


Рис. 2.6: Зависимость числа крупных частиц в пучке от времени.

### 2.2.2 Моделирование динамики пучка с виртуальным катодом в автономном режиме

В отличие от одномерной модели, где максимальное число частиц не превышало  $10^4$ , в рамках трехмерного моделирования число используемых в расчете крупных частиц на каждом шаге составляет примерно  $10^6$  (см. рисунок 2.6). Численный эксперимент с использованием такого количества крупных частиц в пучке значительно увеличивает точность получаемых результатов.

По зависимости, представленной на рисунке 2.6 видно, что число частиц в системе не является постоянным и после завершения переходного процесса длительностью порядка  $t_{tr} \sim 8$  нс, совершает колебания, связанные с образованием колеблющегося виртуального катода и периодическим сбросом заряда из области дрейфа.

Рассмотрим подробнее процесс формирования виртуального катода в исследуемой виркаторной системе. Для анализа процесса образования электронного сгустка в пространстве дрейфа воспользуемся классическим подходом к изучению динамики электронных пучков – построению фазовых портретов пучка. На рисунке 2.7 представлены фазовые портреты пучка в коор-



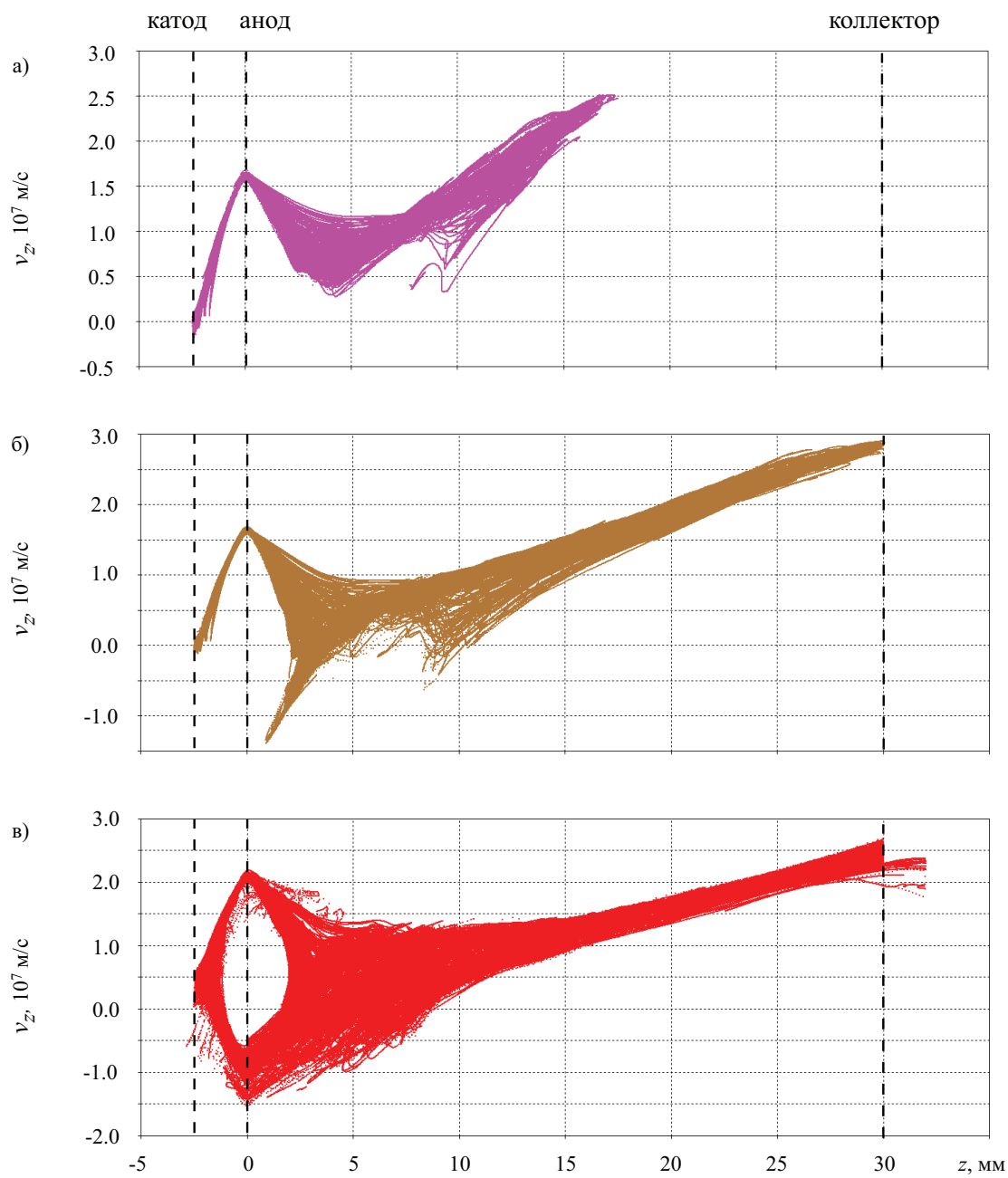


Рис. 2.7: Фазовые портреты пучка в координатах  $(v_z, z)$ :  $t = 2.0$  нс (а);  $t = 6$  нс (б);  $t = 8.5$  нс (в).

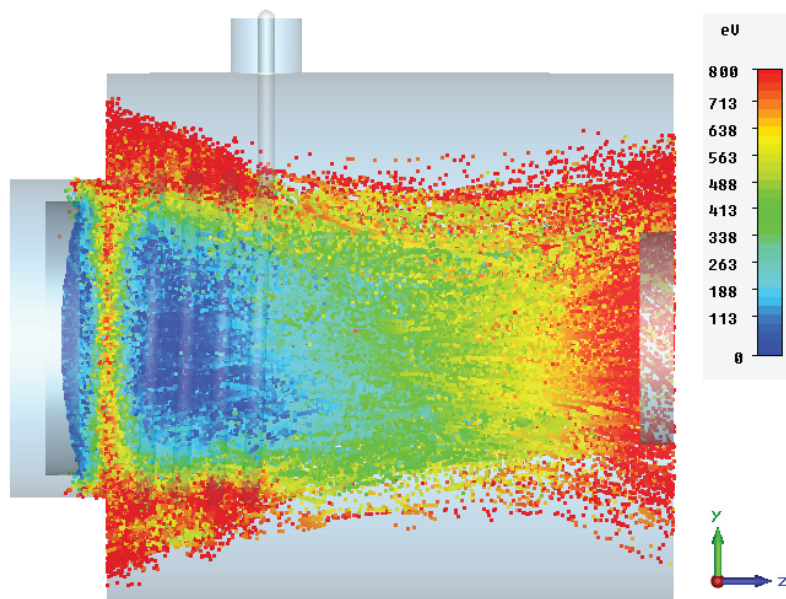


Рис. 2.8: Распределение частиц в пучке в момент времени  $t = 8.5$  нс. Шкала цветов отображает распределение частиц по энергиям.

динамах  $(v_z, z)$ . Первый фазовый портрет (рис. 2.7(а)) отражает поведение электронного потока в самом начале переходного процесса при  $t = 2.0$  нс. Плоскость  $z = -2$  мм соответствует положению катода, плоскость  $z = 0$  мм – анодной сетке,  $z = 30$  – коллектору,  $z = 32$  – дальней стенке пространства дрейфа. Видно, что пучок ускоряется в промежутке между катодом и анодом. После прохождения анодной сетки электронный поток начинает тормозиться вдоль оси  $z$  под действием сил пространственного заряда – в области плоскости  $z = 4$  мм появляется уменьшение скорости частиц вследствие провисания потенциала в этой области. При этом, силы пространственного заряда тормозят частицы, которые ещё не достигли плоскости  $z = 4$  мм и, наоборот, ускоряет частицы, преодолевшие эту плоскость. Скорость частиц в области провисания потенциала достигает нуля, а затем оказывается в отрицательной области, что говорит о появлении отраженного потока и образовании виртуального катода в пространстве дрейфа. Описанная ситуация проиллюстрирована на рисунке 2.7(б), где виртуальный катод уже сформирован и отмечен стрелкой. На рисунке 2.7(в) представлен фазовый портрет пучка в

режиме образования развитого виртуального катода. Видно, что в окрестности плоскости  $z = 4$  мм в пространстве дрейфа наблюдается образование плотного электронного сгустка. Распределение частиц в пучке, соответствующих последнему фазовому портрету, показано на рисунке 2.8. Частицы с наименьшими энергиями образуют на левой границе пространства дрейфа нестационарный виртуальный катод. К сожалению, как фазовые портреты, так и мгновенные распределения частиц являются статичными “снимками” состояния системы, и не могут отразить колебательную динамику частиц в пучке.

Для анализа колебательной динамики виртуального катода рассмотрим временные реализации осцилляций  $z$ -компоненты электрического поля в пространстве дрейфа. Для того, чтобы отобразить пространственно-временную динамику поля, мы установили четыре пробника, регистрирующие колебания поля в различных точках пространства дрейфа. Временные ряды колебаний поля приведены на рисунке 2.9. Видно, что наиболее развитые колебания электрического поля имеют место в окрестности левой границы пространства дрейфа, а именно в области формирования виртуального катода. Установившиеся колебания виртуального катода в пространстве дрейфа близки к периодическим с высоким уровнем шума. При этом амплитуда колебаний быстро затухает с ростом значения координаты  $z$ .

Колебания поля в окрестности формирования виртуального катода, эффективно возбуждают колебания в электродинамической спиральной системе и на выходе мы получаем сигнал, качественно схожий с колебаниями электрического поля. Это видно как по форме колебаний, так и по спектральному составу – оба спектра имеют основную составляющую, ярко выраженную над шумовым пьедесталом, которая соответствует  $f_{vc} \sim 0.95$  ГГц. Мощность выходных колебаний при этом сравнительно мала и достигает

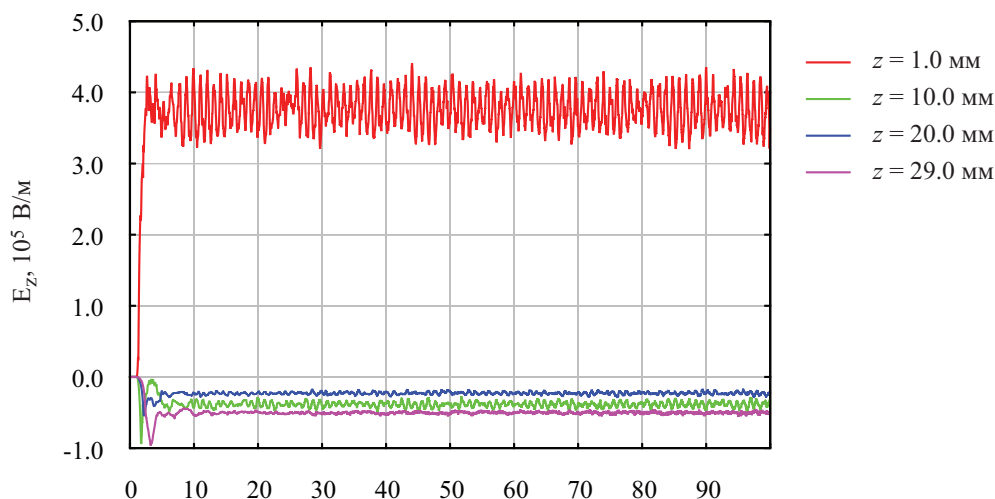


Рис. 2.9: Колебания  $z$ -составляющей электрического поля в различных точках пространства дрейфа.

всего лишь нескольких десятых Ватта. Результаты численного моделирования качественно и количественно согласуются с экспериментальными работами [52, 119], где главная частота выходного СВЧ излучения не превышала 3 ГГц, а выходная мощность нескольких сотен миллиВатт. При этом выходной сигнал также содержал высокий уровень шумовой составляющей

## 2.3 Ввод внешнего сигнала

После построения модели и изучения особенностей работы автономного низковольтного слаботоочного виркатора в среде CST PS было проведено численное моделирование процессов в генераторе на виртуальном катоде и исследования его выходных характеристик под действием внешнего гармонического сигнала. Подраздел посвящен обсуждению особенностей изменения конструкции низковольтного виркатора для работы в неавтономном режиме, а также основных результатов численного моделирования. В подразделе приводится сравнение результатов численного моделирования, включая результаты численного моделирования пучка в генераторе на виртуальном катоде в рамках одномерной модели, с данными экспериментального исследования.

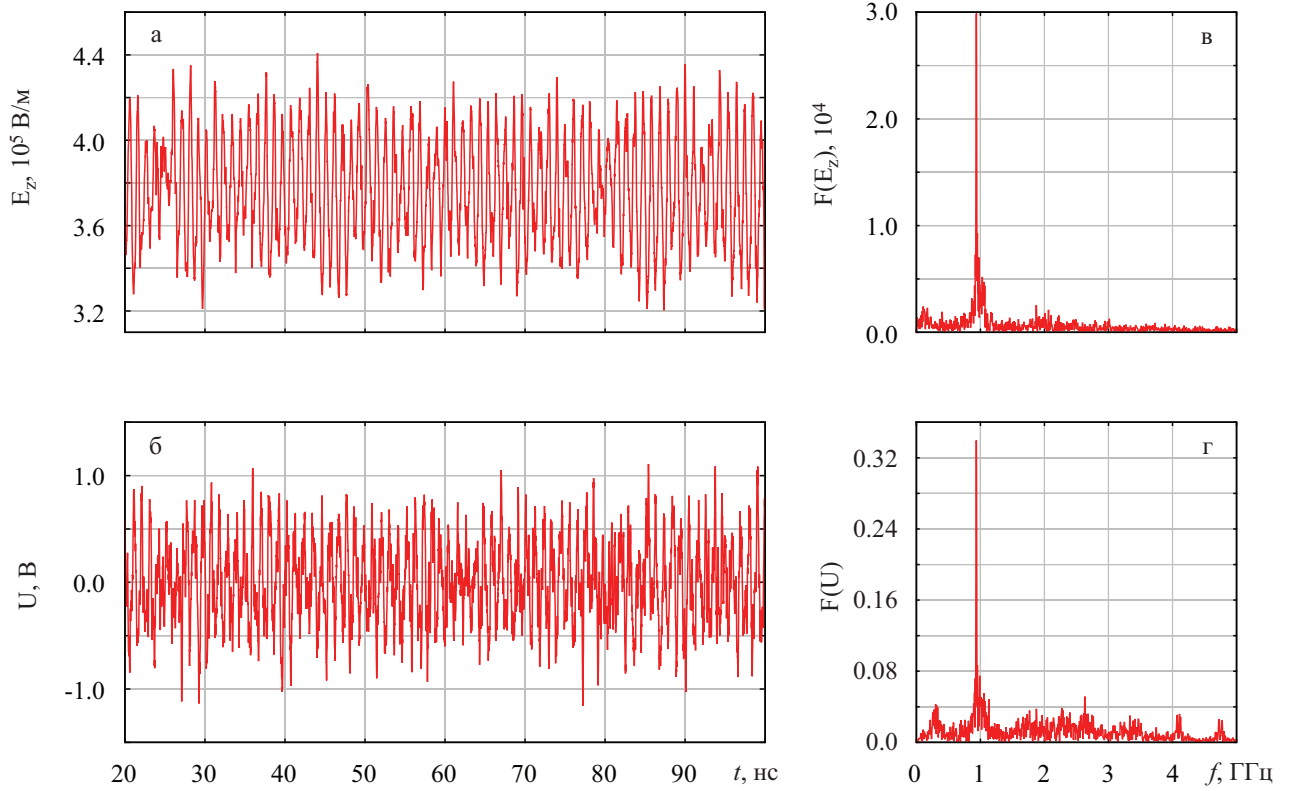


Рис. 2.10: Временные ряды (а,б) и спектры (в,г) колебаний z-компоненты электрического поля в окрестности формирования виртуального катода  $E_z$  и выходного сигнала  $U$ .

### 2.3.1 Результаты численного моделирования

На рисунке 2.11 приведена модифицированная схема, рассмотренного в предыдущей главе генератора на виртуальном катоде, с возможностью ввода внешнего сигнала в систему. Влияние внешнего воздействия учитывается как предварительная модуляция интенсивного электронного потока по скорости на входе в пространство дрейфа. Для этого, между электронной пушкой и камерой дрейфа вставлен модулятор длиной  $L_{mod} = 5$  мм. Ввод внешнего сигнала в пространство модуляции осуществляется с помощью коаксиального волновода. Штырь входного коаксиального волновода соединен с модулирующей спиралью. Обратим внимание на то, что входная спираль гораздо меньше выходной спирали составляет один виток соответственно экспериментальной макету. Короткая длина пространства модуляции выбрана из тех соображений, чтобы избежать образования в пушечной части вирту-

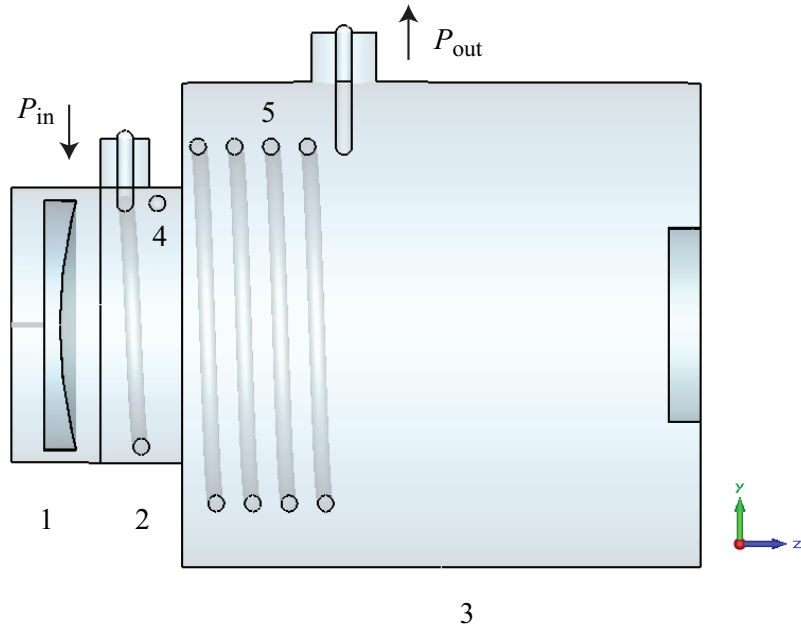


Рис. 2.11: Схема низковольтного генератора на виртуальном катоде, модифицированная для работы в неавтономном режиме. Здесь: 1 – электронная пушка; 2 – модулятор; 3 – пространство дрейфа; 4 – входная спиральная структура; 5 – выходная спиральная структура.

ального катода. При этом шаг модулирующей спирали соответствует шагу выходной спирали  $d_h = h/n_h = 2.25$  мм.

Получаемые результаты в ходе численного моделирования при помощи трехмерной полностью электромагнитной модели пучка находятся в хорошем качественном согласии с результатами одномерного моделирования электронного потока под воздействием внешнего монохроматического сигнала, представленным в разделе 1.2.3. На рисунке 2.12 показана зависимость выходных характеристик неавтономного генератора на виртуальном катоде от уровня мощности внешнего гармонического сигнала. Следует заметить, что частота внешнего воздействия была незначительно отстроена от частоты колебаний виртуального катода в автономном режиме  $f_{ext} = 1.01f_0$ .

Поведение интегральной выходной мощности (рисунок 2.12(a)) аналогично показанному ранее как в рамках стационарной аналитической модели, так и в рамках одномерного численного моделирования пучка: рост мощности входного сигнала сопровождается значительным увеличением мощности

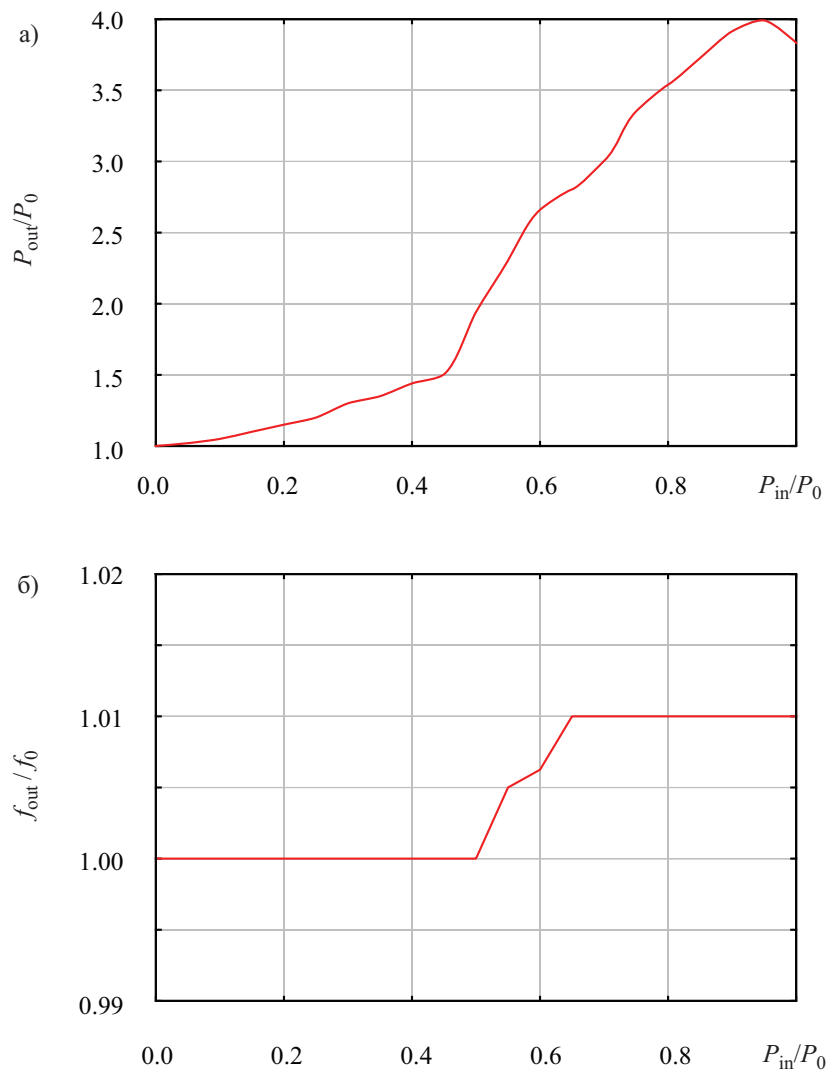


Рис. 2.12: Зависимость нормированных мощности (а) и частоты (б) выходного сигнала неавтономного низковольтного генератора на виртуальном катоде от нормированной мощности внешнего гармонического воздействия. Мощность входного и выходного сигналов нормирована на выходную мощность генератора в автономном режиме  $P_0$ , а частота выходного излучения нормирована на частоту выходного сигнала автономного генератора на виртуальном катоде  $f_0$ .

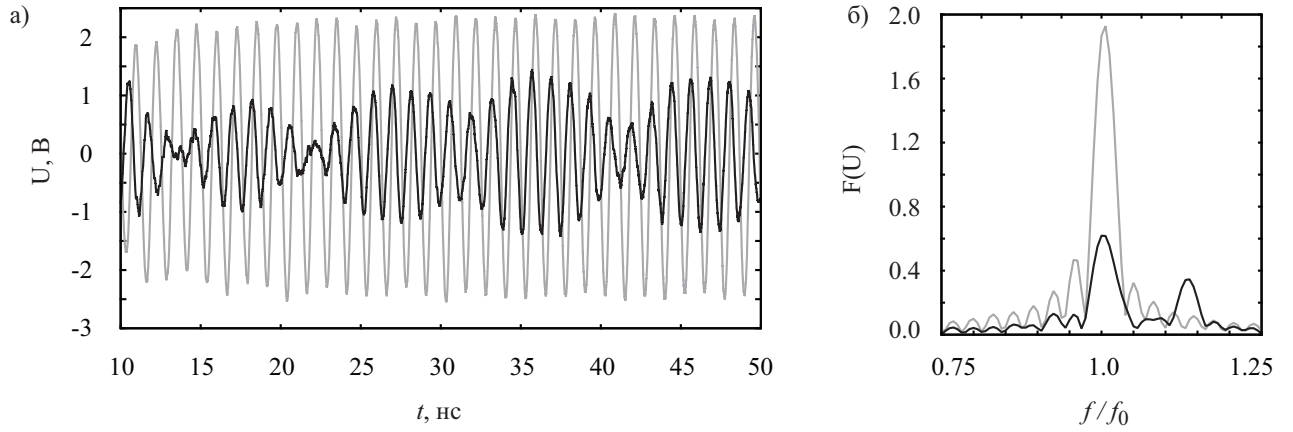


Рис. 2.13: Временные ряды колебаний выходного сигнала (а) и их спектры (б) для двух различных частот внешнего воздействия при фиксированной мощности управляющего сигнала  $P_{in} = 0.95P_0$ . Черные кривые соответствуют  $f_{ext} = 1.1f_0$ , а светло-серые –  $f_{ext} = 1.0f_0$

выходного электромагнитного излучения генератора на виртуальном катоде. При этом, как было показано в одномерной модели, в зависимости мощности выходного сигнала от мощности внешнего воздействия наблюдается максимум и последующий спад, который объясняется снижением эффективности группировки пучка в области образования виртуального катода.

Введение незначительной расстройки между управляющим сигналом и собственной частотой колебаний виртуального катода позволило наблюдать перестройку частоты выходного сигнала при увеличении мощности внешнего воздействия. Изменение частоты генерации говорит об установлении синхронизации между колебательной динамикой виртуального катода в пучке и внешним воздействием. Также можно видеть, что перестройка частоты сопровождается существенным ростом интегральной выходной мощности генерации вследствие повышения эффективности взаимодействия внешнего сигнала с виртуальным катодом. Этот результат также находится в согласии с исследованиями синхронизации в рамках одномерной модели пучка, проведенном в разделе 1.3.2.

Существенная расстройка частоты входного сигнала и собственных колебаний виртуального катода приводит к значительному уменьшению вы-



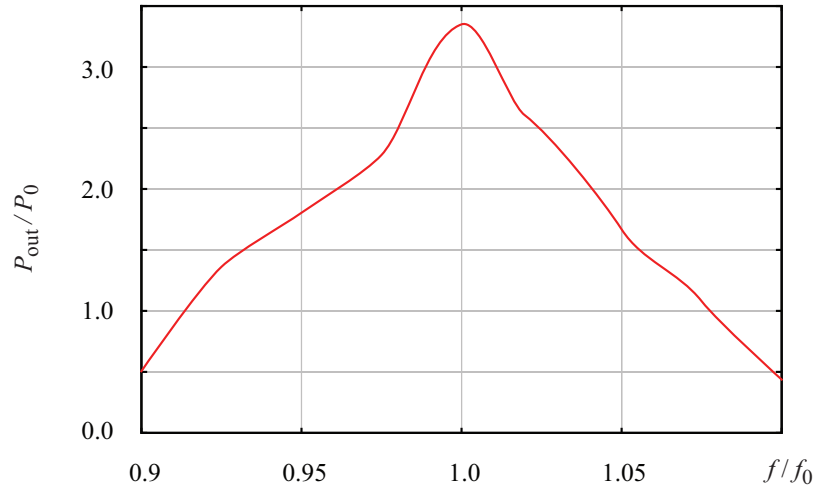


Рис. 2.14: Зависимость нормированной интегральной выходной мощности неавтономного низковольтного виркатора от нормированной частоты внешнего воздействия при постоянной мощности управляющего сигнала  $P_{in} = 0.9P_0$

ходной мощности, поскольку понижает эффективность группировки пучка в пространстве дрейфа и как следствие уменьшает амплитуду колебаний поля в окрестности образования виртуального катода. Временные ряды выходного излучения показаны на рисунке 2.13. Можно заметить, что при совпадении частот внешнего сигнала и собственных колебаний виртуального катода энергия внешнего воздействия эффективно вносится в систему, что приводит к устойчивой генерации периодического сигнала с единственной компонентой в спектре соответствующей основной частоте колебаний виртуального катода. При внесении значительной расстройки между частотами амплитуда выходного сигнала становится существенно меньше, а сам сигнал представляет собой биения. При этом в спектре присутствуют две компоненты, соответствующие собственной частоте и частоте внешнего сигнала. В данном случае спектральная компонента, соответствующая частоте колебаний виртуального катода гораздо ниже по уровню, нежели в случае отсутствия расстройки частот. Это также подтверждает амплитудно-частотная характеристика неавтономного генератора на виртуальном катоде, построенная в окрестности ос-

новой частоты автономной генерации  $f_0$ . Данная зависимость приведена на рисунке 2.14.

### 2.3.2 Сравнение с результатами эксперимента

Проведем сравнение результатов, полученных в ходе численного моделирования неавтономного нерелятивистского виркатора, с результатами экспериментального исследования вопроса увеличения выходной мощности генератора на виртуальном катоде, представленными в работе [83]. В представленной работе в качестве управляющего сигнала рассматривался гармонический сигнал. Кратко опишем экспериментальную установку, использованную в данной работе, а также ее основные параметры. Исследуемый неавтономный нерелятивистский виркатор состоит из электронной пушки, в состав которой входит термоэмиссионный катод и фокусирующий электрод, формирующей аксиально-симметричный сплошной электронный пучок радиусом  $r_b = 4$  мм. Пучок инжектируется в цилиндрическую рабочую камеру виркатора, которая ограничена входной (первой) сеткой с одной стороны и выходной (второй) сеткой с другой стороны. Расстояние между сетками пространства дрейфа составляет  $l = 50$  мм. Частицы, покидающие рабочую камеру через выходную стечку, оседают на коллекторе, расположенном за выходной сеткой. Ускоряющее напряжение и ток пучка в эксперименте составляли соответственно  $V_0 = 3.0$  кВ и  $I_0 = 0.25$  А. В рассматриваемой экспериментальной установке существует возможность создания дополнительного тормозящего поля в пространстве дрейфа виртуального катода за счет подачи отрицательного потенциала  $V_r$  на выходную сетку рабочей камеры виркатора. Увеличение тормозящего потенциала на выходной сетке приводило к образованию колеблющего виртуального катода в пучке. Мощность колебаний виртуального катода выводилась с помощью отрезка широкополосной спиральной замед-

ляющей системы, расположенной в рабочей камере виркатора. Оптимальная генерация достигалась при величине тормозящей разности потенциалов между первой и второй сетками  $\Delta V_r = 0.35$ , где  $\Delta V_r = |V_r - V_0|/V_0$ . Ввод внешнего сигнала в рассматриваемую низковольтную виркаторную систему осуществляется с помощью его подачи на дополнительный модулирующий отрезок спиральной электродинамической системы, расположенный между анодной сеткой электронной пушки и первой сеткой пространства дрейфа. Таким образом подача внешнего сигнала приводит к скоростной модуляции электронного пучка на входе в рабочую камеру низковольтного виркатора. Внешний сигнал создается при помощи генераторов гармонического сигнала Г4-79 и Г4-80.

На рисунке 2.15 приведено сопоставление результатов экспериментального исследования неавтономной динамики слаботоочного генератора на виртуальном катоде и трехмерного полностью электромагнитного моделирования. Стоит сразу же отметить, что численное моделирование качественно отражает картину, получаемую в ходе экспериментального исследования. В зависимости выходной мощности от мощности входного сигнала есть пик при оптимальной мощности внешнего воздействия, обусловленный наиболее эффективной группировкой пучка в области образования виртуального катода. Зависимость мощности выходного излучения от частоты внешнего воздействия как в эксперименте, так и в теоретическом исследовании носит принципиально резонансный характер. Эффективность взаимодействия модулирующего поля, создаваемого внешним электромагнитным сигналом, максимальна при частоте внешнего воздействия близкой к собственным колебаниям виртуального катода в пучке. Сдвиг частоты в большую или меньшую сторону относительно  $f_{vc}$  приводит к падению выходной мощности неавтономного виркатора в следствие ухудшения взаимодействия поля с пучком и

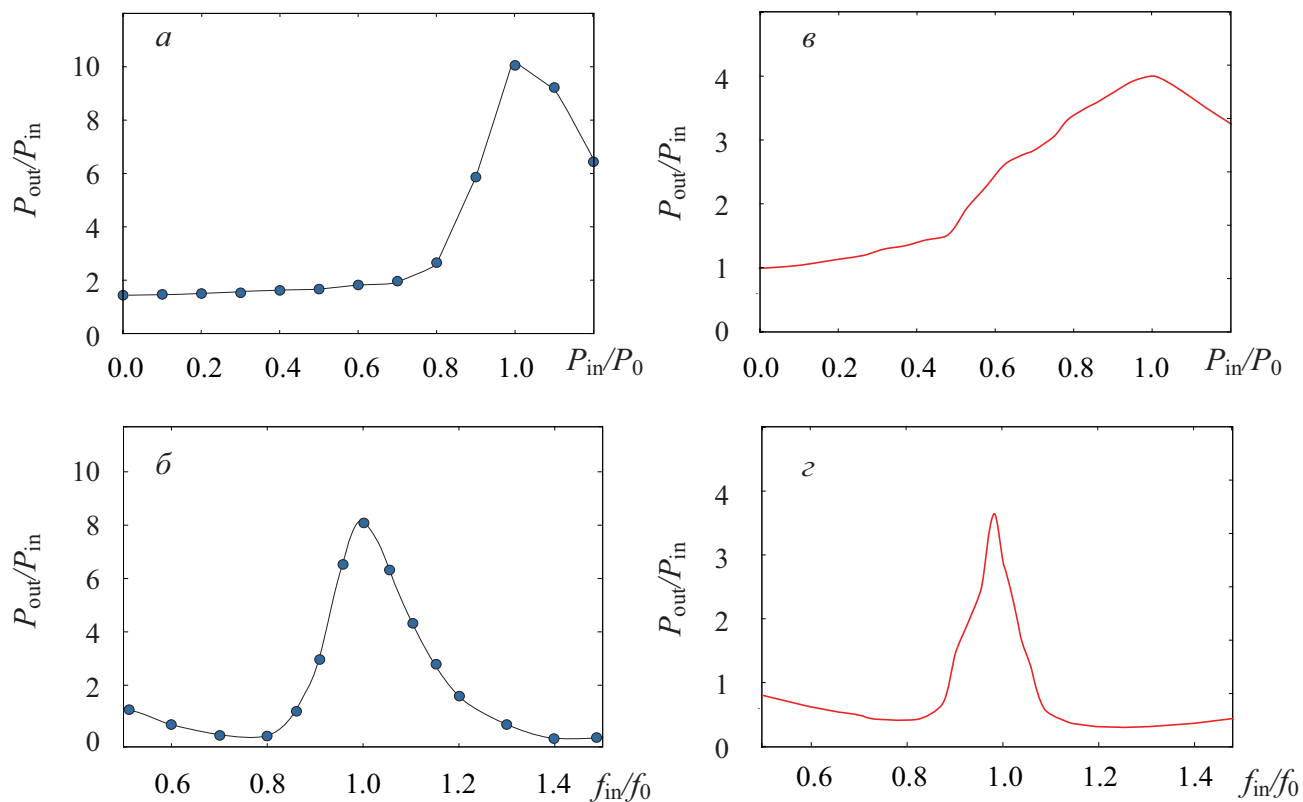


Рис. 2.15: Зависимость мощности неавтономного виркатора от мощности внешнего сигнала (а,в) и частоты внешнего сигнала (б,г). Приведенные зависимости получены в ходе экспериментального исследования (а,б) и численного моделирования с помощью программного комплекса CST Particle Studio (в,г). Мощность входного и выходного сигнала нормирована на мощность автономной генерации, частота входного сигнала нормирована на частоту генерации виркатора в автономном режиме.

разрушения структуры виртуального катода в силу того, что пучок перестает эффективно группироваться в окрестности виртуального катода.

## 2.4 Выводы

Во второй главе диссертационной работы проведено детальное численное моделирование динамики интенсивного электронного потока в низковольтном генераторе на виртуальном катоде в рамках полностью электромагнитной трехмерной *particle-in-cell* модели. Были найдены условия для формирования в исследуемой низковольтной виркаторной системе нестационарного колеблющегося виртуального катода: определены оптимальные геометрические параметры компонент схемы виркатора, а также обнаружено значение критического тока, при превышении которого в пучке образуется плотный электронный сгусток.

Помимо этого была проведена модификация автономной схемы низковольтного виркатора с целью возможности ввода внешнего сигнала и оказания воздействия на пучок. Для этого в пушечной части было создано пространство предварительной скоростной модуляции пучка, ограниченное анодной сеткой и входной сеткой пространства дрейфа. Внешний СВЧ сигнал вводился в пространство дрейфа с помощью коаксиального волновода, центральная жила которого была соединена с витком модулирующей спирали. Поле спирали оказывало воздействие на пучок на частоте внешнего управляющего сигнала.

Было проведено изучения возможности контроля выходными характеристиками прибора за счет управления динамикой пучка внешним сигналом. В частности исследованы зависимости мощности и частоты выходного сигнала от уровня мощности и частоты внешнего воздействия. Показано качественное совпадение полученных результатов с результатами одномерного

численного моделирования пучка, приведенными в предыдущей главе. Как и ранее, система демонстрирует рост выходной мощности при увеличении мощности внешнего воздействия на частотах, близких к собственным частотам колебаний виртуального катода. Помимо этого, результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при изучении неавтономной динамики низковольтного генератора на виртуальном катоде научной группе профессора Ю.А. Калинина. Это свидетельствует о корректности построенных численных моделей и справедливости проведенных аналитических оценок и результатах численного моделирования.

## Глава 3

### **Усиление сигнала в виркаторной системе, содержащей релятивистский электронный поток**

#### **3.1 Введение**

В предыдущих главах настоящей диссертационной работы было проведено детальное исследование эффекта увеличения выходной мощности генераторов на виртуальном катоде за счет подачи внешнего воздействия. Глава 1 была посвящена подробному изучению механизмов увеличения мощности колебаний виртуального катода на примере стационарной аналитической и одномерной численной моделей пучка. В главе 2 было проведено полномасштабное трехмерное численное моделирование нестационарных процессов в пучке в неавтономном СВЧ приборе с виртуальным катодом и сравнение результатов моделирования с данными исследования на экспериментальной установке. Проведенные исследования показывают возможность повышения эффективности работы СВЧ прибора, содержащего интенсивный электронный поток в режиме формирования виртуального катода за счет внешнего воздействия, поскольку при определенной величине амплитуды внешнего сигнала можно существенно увеличить мощность генерации.

Исследования, описанные в данной главе, посвящены применению подробно изученных в предыдущих главах физических механизмов, приводящих к значительному росту выходной мощности низковольтных виркаторных систем, для создания перспективного СВЧ усилителя высоких мощностей на

основе релятивистского электронного пучка со сверхкритическим током. За основу разработанной модели усилителя была взята схема релятивистского виртода – источника импульсного СВЧ излучения высокого уровня мощности [37, 46, 47, 59, 135]. Достоинствами этой виркаторной системы для создания на ее основе усилительного прибора являются наличие пространства для предварительной скоростной модуляции пучка по скорости, куда можно эффективно вводить внешний сигнал, а также высокая эффективность работы. Разработка модели и численный анализ виртода-усилителя были проведены в среде CST Particle Studio, которая является мощным инструментом для проведения трехмерного полностью электромагнитного численного моделирования приборов и устройств вакуумной СВЧ электроники (см. разделы 2.1-2.3).

В разделе 3.2 данной главы описывается базовая модель релятивистского виртода, а также обсуждаются достоинства данной релятивистской виркаторной системы. Подраздел 3.2.1 посвящен обсуждению основных особенностей конструкции и режимов генерации релятивистского виртода. Также в этом подразделе приводится краткий обзор результатов экспериментальных исследований данного прибора. В подразделе 3.2.2 описываются особенности создания трехмерной электромагнитной модели пучка и приводится сравнение результатов численного моделирования с известными экспериментальными данными [47, 135]. Детальное описание модификации конструкции релятивистского виртода для работы в режиме усиления внешнего сигнала и представление основные рассчитанные характеристики работы прибора приведены в разделе 3.3. Подраздел 3.3.1 посвящен обсуждению конструктивных особенностей виртода-усилителя, а также математической оптимизации геометрических параметров схемы. В подразделе 3.3.2 показаны результаты численного моделирования усиления СВЧ сигнала в системе с релятивист-



ским пучком в режиме формирования виртуального катода и расчета выходных характеристик прибора. В частности, было показано влияние параметров внешнего сигнала и геометрии прибора на величину коэффициента усиления виртода-усилителя.

## **3.2 Базовая модель – релятивистский двухззорный виркатор с электромагнитной обратной связью**

Предложенная модель высокомоощного усилителя, содержащего интенсивный электронный поток с виртуальным катодом, основывается на схеме источника электромагнитного излучения СВЧ диапазона – релятивистского двухззорного виркатора с электромагнитной связью. В данном разделе настоящей главы описаны геометрические особенности схемы двухззорного виртода и связанные с ними механизмы формирования виртуального катода в релятивистском электронном пучке. Затем, при помощи трехмерного численного моделирования динамики пучка в системе CST PS будет проведен подробный анализ поведения заряженных частиц в пучке в релятивистском виртоде.

### **3.2.1 Генератор импульсов СВЧ излучения высокого уровня мощности – релятивистский виртод**

Релятивистский виртод является перспективным прибором СВЧ электроники, способным генерировать электромагнитное излучение с уровнем мощности порядка нескольких ГВт в диапазоне частот от 1 до 15 ГГц [46, 47]. Высокий уровень выходной мощности определяется большими значениями энергии частиц в релятивистском пучке, для формирования которого в пучечной частиц прикладывается ускоряющее напряжение порядка нескольких мегавольт, а ток пучка с катода достигает нескольких килоампер. При этом, характерным для всего класса виркаторных систем является достаточно низ-

кий КПД, который составляет порядка 1–10% [2,5,8]. Для создания высокого ускоряющего напряжения в экспериментах применяется Марковский генератор, создающий высоковольтный импульс напряжения. Поэтому данный прибор работает в импульсном режиме. Важной особенностью релятивистского виртода является то, что для его работы не требуется приложения внешних магнитных полей для фокусировки пучка.

Для систем СВЧ электроники, содержащих интенсивные потоки заряженных частиц, характерной проблемой является плавающая частота выходного сигнала. Принципиальной особенностью релятивистского виртода, решающей проблему стабилизации частоты выходного излучения, является наличие внешней обратной связи. Первоначально схема виртода была предложена в группе И.И. Магды [37]. В рассматриваемой нами схеме, предложенной в работах Томских коллег [46, 59, 135] в научной группе С.Д. Коровина, а затем продолживших их исследования в группе Я. Красика [47, 136–138]. Внешняя обратная связь реализуется посредством особой геометрии пространства дрейфа, в котором оказывается пучок после преодоления пушечной части. Такое пространство дрейфа представляет собой двухзазорный резонатор, в котором оба зазора соединены друг с другом с помощью окна связи. Данный резонатор устроен таким образом, чтобы формирование нестационарного виртуального катода в пучке происходило во втором зазоре, а ВЧ поля колебаний виртуального катода возбуждали стоячую волну в первом зазоре за счет окна связи. Таким образом осуществляется предварительная скоростная модуляция частиц стоячей волной электромагнитным полем в первом зазоре на частоте колебаний виртуального катода во втором зазоре резонатора. Помимо стабилизации частоты, как будет показано далее, обратная связь в виртоде поддерживает формирование колеблющейся электронной

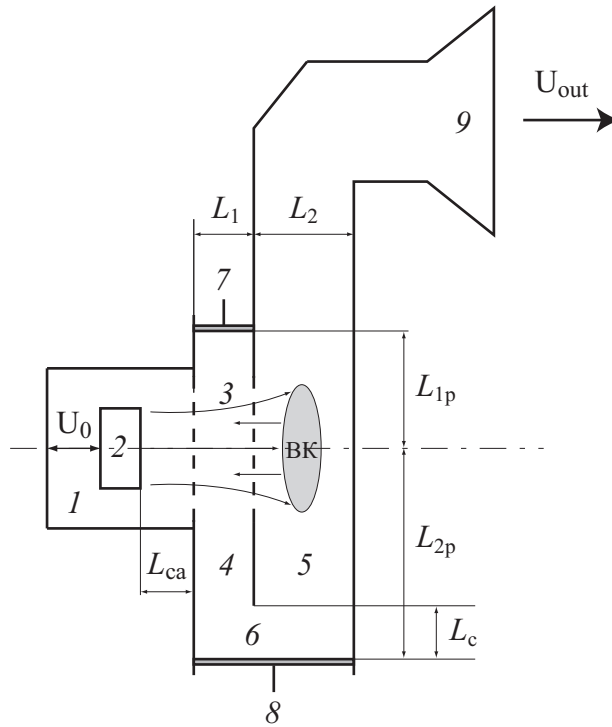


Рис. 3.1: Схема установки релятивистского виртода: 1 – электронная пушка; 2 – катод; 3 – релятивистский электронный пучок; 4 – первая секция двухзазорного резонатора; 5 – вторая секция двухзазорного резонатора; 6 – окно связи; 7 – плунжер, регулирующий высоту первой секции резонатора; 8 – плунжер, регулирующий ширину окна связи; 9 – рупорная антенна. Также на рисунке:  $U_0$  – ускоряющее напряжение;  $L_{ca}$  – расстояние между катодом и анодом;  $L_1$  – длина первой секции;  $L_2$  – длина второй секции;  $L_{1p}$  – положение первого поршня;  $L_{2p}$  – положение второго поршня;  $L_c$  – ширина окна связи;  $U_{out}$  – сигнал, получаемый на выходе.

структуры во втором зазоре, стабилизируя тем самым амплитуду и увеличивая длительность импульса выходных колебаний.

Подробная схема прибора приведена на рисунке 3.1. Пушечная часть виртода представляет собой диодный промежуток, в котором электронный поток инжектируется с катода, расположенного на расстоянии  $L_{ca}$  от анода. В рассматриваемой схеме анод изготовлен из тонкого слоя алюминиевой фольги. Для создания мощных электронных пучков с плотностью тока порядка  $10^6 - 10^7$  А/см<sup>2</sup> в устройствах СВЧ электроники обычно применяется механизм взрывной эмиссии. Такой подход основан на эмиссии электронов с поверхности металла за счет локальных микровзрывов эмитирующей поверхности и позволяет достигать плотностей тока порядка  $10^9$  А/см<sup>2</sup>.

В работе [136] исследовано влияние различных материалов для изготовления катода на эмиссионные свойства электронной пушки и на работу виртода в целом. В этой работе сравнивались три типа катодов: металлодиэлектрический катод, катод из карбонового волокна и “вельветовый” катод. Ряд экспериментов, проведенных в рамках данной работы, показал что импульс выходного СВЧ сигнала с наибольшей длительностью генерировался с использованием вельветового катода (импульс с наибольшей длительностью достигал  $\sim 400$  нс, в то время как для двух других катодов длительность импульса не превышала 250 нс). Также преимуществом вельветового катода является его долговечность, что является немаловажным при получении мощного электронного пучка с помощью взрывной эмиссии с высокой частотой повторения импульсов.

Расстояние между катодом и анодом  $L_{ca}$  выбрано таким образом, чтобы осуществить баланс между извлечением максимально-возможной величины тока пучка в диодном промежутке катод-анод и предотвращением электрического пробоя в этом диодном промежутке. В экспериментах [46, 47] величина  $L_{ca}$  варьировалась от 15 до 24 мм.

Сформированный в электронной пушке мощный релятивистский электронный пучок попадает в двухзазорный резонатор. Обсудим более детально геометрические параметры этой электродинамической системы. Длина первой секции двухзазорного резонатора виртода выбрана меньше длины второй секции во избежание образования виртуального катода в первом зазоре ( $L_1 \approx L_2/5$ ). В свою очередь длина второго зазора близка к диаметру пучка для более эффективного формирования виртуального катода и снижения критического тока для образования колеблющегося виртуального катода ( $L_2 \approx D_b$ , где  $D_b$  – диаметр пучка). Как было сказано ранее, колебания электромагнитного поля во втором зазоре, создаваемые нестационарным вирту-

альным катодом, возбуждают колебания поля в первом зазоре для модуляции проходящего электронного потока на частоте колебаний виртуального катода. Поэтому важным фактором, определяющим геометрию резонатора, является соблюдение оптимального сдвига фаз между колебаниями ВЧ поля на оси пучка в первом и втором зазорах. Согласно работе [135], в виртоде предпринята попытка создать режим синфазных полей  $\Delta\varphi = 0$ . В соответствии с рисунком 3.2 это означает, что осцилляции СВЧ поля в первом зазоре и верхней части второго зазора представляют собой стоячую волну, а колебания СВЧ поля в нижней части второго зазора являются бегущей волной и выводятся при помощи рупорной антенны. Положения поршней  $L_{1p}$  и  $L_{2p}$  выбираются таким образом, чтобы они отстояли на  $\approx 3\lambda/4$  от оси пучка, где  $\lambda$  – это длина волны колебаний выходного сигнала. В этом случае в первом зазоре образуется стоячая волна, состоящая из 3 полуволн и симметричная относительно оси пучка. Это приводит к тому, что пучок проходит через пучности поля в первом и втором зазорах и эффективно взаимодействует с электромагнитным полем. Варьированием ширины окна связи добиваются выполнения условия равенства амплитуд колебаний ВЧ поля в первом и втором зазорах резонатора  $E_1 \approx E_2$ .

Как можно заметить из описания геометрических параметров установки, частота колебаний выходного излучения полностью зависит от размеров резонатора и может изменяться при соответствующей механической подстройке плунжеров 7 и 8. Однако, как и в любой виркаторной системе значение тока пучка играет ключевую роль в формировании виртуального катода и генерации СВЧ излучения. При анализе поведения релятивистского электронного пучка в виртоде в ранних теоретических и экспериментальных работах [26, 47] было показано, что для данной системы можно выделить два характерных значения критического тока, которые существенно изме-

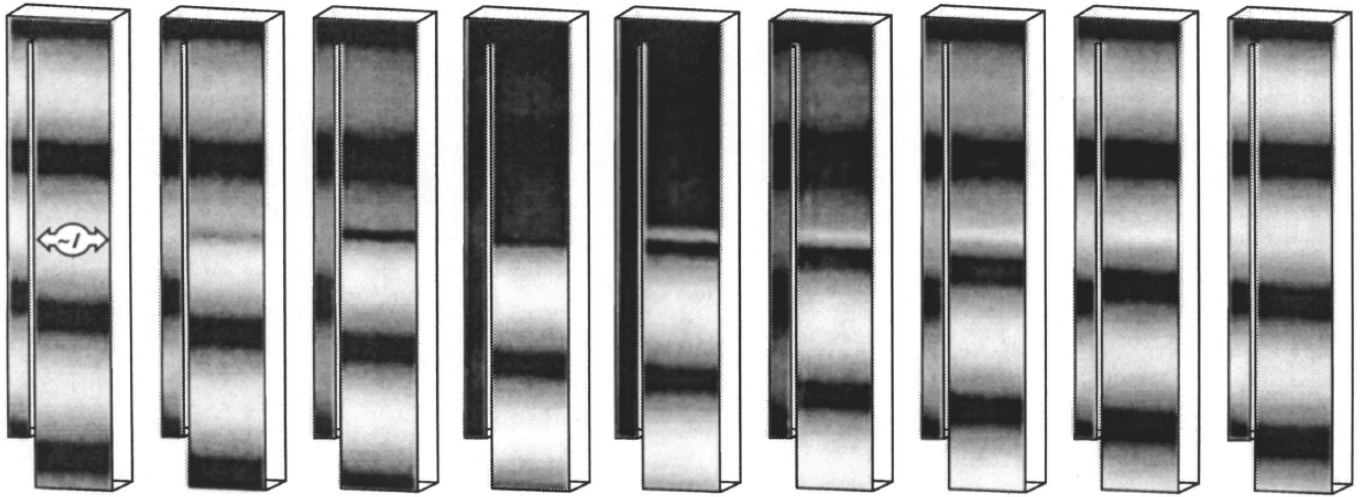


Рис. 3.2: Изменение распределения модуля амплитуды электрического поля в двухзазорном резонаторе виртода в сечении  $x = 0$  в течении половины периода колебаний ВЧ поля. Иллюстрация заимствована из работы [135].

няют поведение заряженных частиц в пучке. Первый критический ток  $I_{кр1}$  определяет появление отраженного тока – при  $I_0 < I_{кр1}$  пучок является стационарным. Превышение током пучка первого критического тока приводит к формированию в системе стационарного виртуального катода. Виртуальный катод является стационарным на участке  $I_{кр1} < I_0 < I_{кр2}$ . При этом число частиц, проходящих виртуальный катод, падает, а частиц, отраженных от виртуального катода, стремительно растет. Так как отраженные частицы в этой системе играют главную роль в энергообмене с электромагнитным полем, то увеличение их числа приводит к возникновению колебаний виртуального катода в пространстве и времени. Появление мощных колебаний виртуального катода связано с превышением током пучка величины второго критического тока  $I_{кр2}$ . Экспериментально и теоретически показано [47], что появление генерации в системе происходит при отношении проходящего тока к току пучка  $\approx 25 - 30\%$ . Таким образом, рабочий режим релятивистского виртода начинается при слабом превышении током пучка второго критического тока  $I_{кр2}$ .

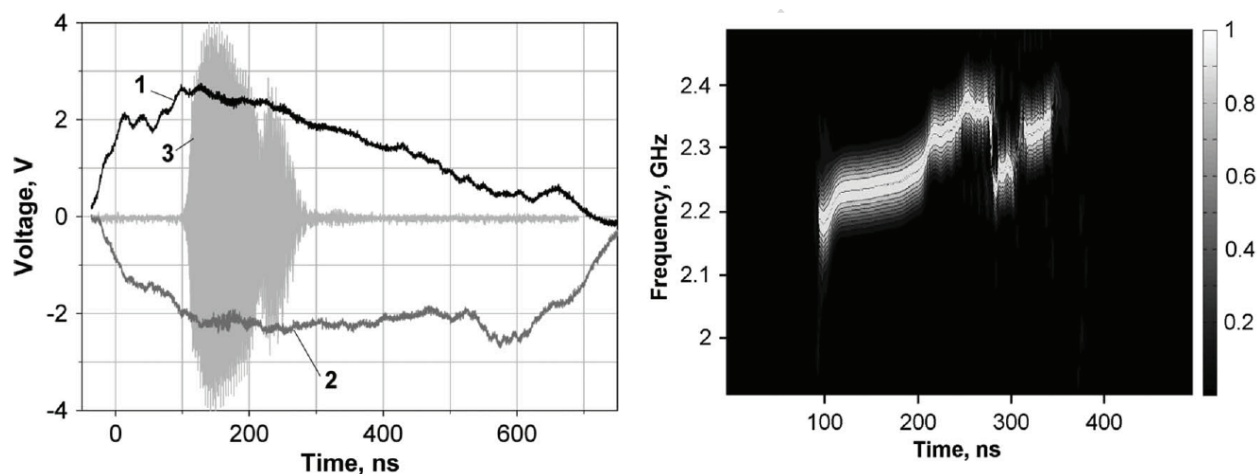


Рис. 3.3: Результаты экспериментального исследования двухзазорного виртода. Слева: 1 – форма импульса ускоряющего напряжения; 2 – ток пучка, регистрируемый в электронной пушке; 3 – характерная форма импульса колебаний выходного СВЧ излучения релятивистского виртода; Справа: зависимость спектра выходного излучения от времени. Иллюстрация заимствована из работы [47].

После подробного обсуждения схемы устройства и параметров пучка рассмотрим особенности выходного излучения релятивистского виртода и его характеристики. На рисунке 3.3 представлены экспериментальные временные ряды ускоряющего напряжения, тока пучка и колебаний выходного сигнала, а также зависимость спектра выходного излучения от времени. Из рисунка 3.3 (а) можно заметить, что длительность импульса выходного СВЧ излучения релятивистского виртода значительно меньше длительности импульса ускоряющего напряжения. Ряд проведенных исследований, посвященных данному вопросу, показал, что подобный срыв генерации связан с образованием положительного ионного фона, нейтрализующего отрицательный пространственный заряд в пучке, за счет существенного разогрева металлической фольги, что является типичной проблемой при работе с высокоэнергетическими релятивистскими электронными пучками. Однако, как будет показано далее в подразделе 3.2.2, нейтрализация отрицательного заряда в пучке положительными ионами является не единственным механизмом, ответственным за срыв генерации и образования виртуального катода

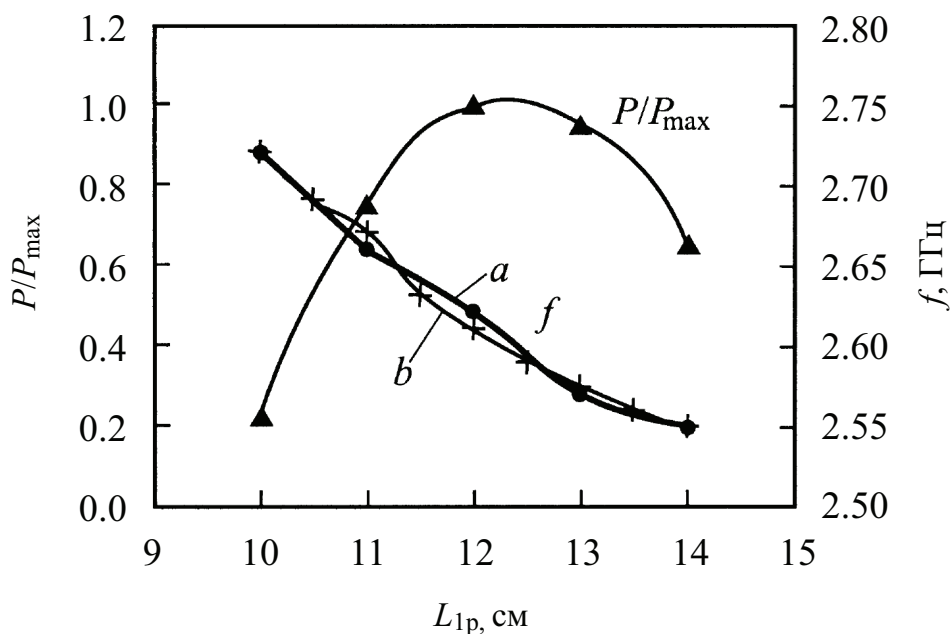


Рис. 3.4: Экспериментальные зависимости нормированной мощности и частоты выходного сигнала от положения верхнего поршня в первом зазоре резонатора. Здесь: результаты эксперимента (а), результаты электродинамических измерений (б). Иллюстрация заимствована из работы [135].

в пучке. Стоит заметить, что, как видно из рисунка 3.3 (б), на протяжении всей длительности импульса колебания электромагнитного СВЧ излучения релятивистского виртода демонстрируют достаточно стабильную частоту на уровне  $2.2 \div 2.3$  ГГц.

Как уже было сказано, характеристики выходного сигнала виртода можно варьировать за счет механической перестройки геометрии резонатора. На рисунке 3.4 представлены результаты экспериментального исследования выходных характеристик релятивистского двухзазорного виркатора при изменении положения верхнего плунжера первой секции двухзазорного резонатора (см. рисунок 3.1) [135]. Видно, что зависимость мощности выходного СВЧ излучения от положения верхнего поршня имеет максимальное значение при  $L_{1p} = 12$  см. Это означает, что при подобранных таким образом геометрических параметрах резонатора электронный пучок наиболее эффективно взаимодействует с электромагнитным полем в первом зазоре резонатора. При



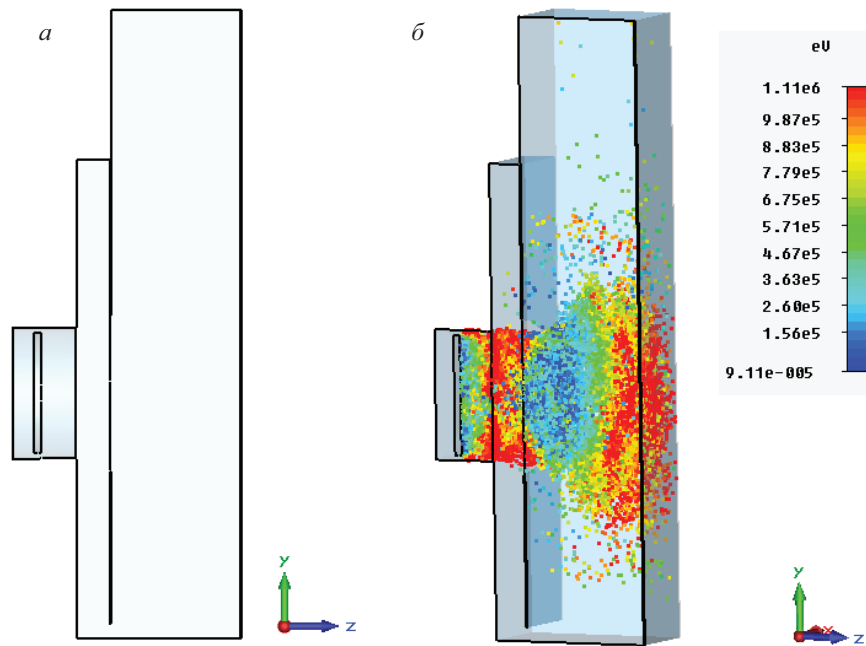


Рис. 3.5: Сечение в плоскости  $x = 0$  схемы релятивистского виртода, построенной в CST PS, (а) и трехмерная модель виртода в присутствии частиц (б).

этом, как показывают результаты эксперимента (рисунок 3.4, а), с отдалением положения поршня от оси пучка частота генерации падает. Это объясняется увеличением длины стоячей волны электромагнитного поля, которая образуется в первом зазоре и за счет взаимодействия с которой происходит скоростная модуляция пучка. Стоит заметить, что результаты измерения частоты выходного сигнала хорошо сочетаются с результатами электродинамических измерений собственных колебаний (рисунок 3.4, б), реализующихся в двухзазорном резонаторе релятивистского виртода. Это ещё раз подтверждает тот факт, что частота колебаний выходного СВЧ излучения полностью определяется геометрией двухзазорного резонатора.

### 3.2.2 Трехмерное численное моделирование релятивистского виртода в среде CST Particle Studio

С помощью программного продукта CST PS было проведено численное моделирование схемы релятивистского виртода, описанной в предыдущем под-

разделе 3.2.1, в рамках трехмерной полностью электромагнитной численной модели. На рисунке 3.5 представлена модель виртода, разработанная в среде CST PS. Геометрические параметры, подобранные в ходе разработки модели, соответствуют условиям и требованиям, предъявленным к конструкции прибора в подразделе 3.2.1. Опишем подробно геометрические параметры анализируемого устройства в рамках численного моделирования: радиус катода –  $r_c = 43$  мм; радиус электронной пушки –  $r_g = 47.3$  мм; расстояние между катодом и анодной сеткой –  $L_{ca} = 24.4$  мм; длина первого зазора –  $L_1 = 23.7$  мм; расстояние между верхним поршнем в первом зазоре и осью пучка –  $L_{1p} = 166.5$  мм; расстояние между нижним поршнем и осью пучка –  $L_{2p} = 174.4$  мм; длина второго зазора –  $L_2 = 91.7$  мм; положение выходного волновода относительно оси пучка –  $L_{out} = 272.4$  мм; ширина резонатора (одинаковая в обоих зазорах) –  $D = 115.56$  мм; ширина окна связи –  $L_{св} = 9.8$  мм. Приведенные размерные параметры прибора были подобраны в ходе проведения математической оптимизации геометрии виртода.

С помощью расчета собственных полей двухзазорного резонатора была обнаружена мода колебаний электромагнитного поля, которая будет наиболее эффективно взаимодействовать с релятивистским электронным пучком в первом зазоре (рисунок 3.6). Как видно, стоячая волна симметрична относительно оси пучка и имеет три вариации вдоль оси  $y$ , при этом центральная находится на оси пучка. Расчет также показал, что частота колебаний поля на этой моде составляет  $f_e = 1.86$  ГГц. Модуляция электронного потока по скорости на данной частоте колебаний поля в первом резонаторе определяет частоту колебаний выходного сигнала  $f_{out} = f_e$ .

Отметим, что в рамках рассматриваемой численной модели инжекция электронного пучка осуществлялась при помощи задания фиксированного тока эмиссии и энергии частиц, а прикладываемое ускоряющее. Для создания

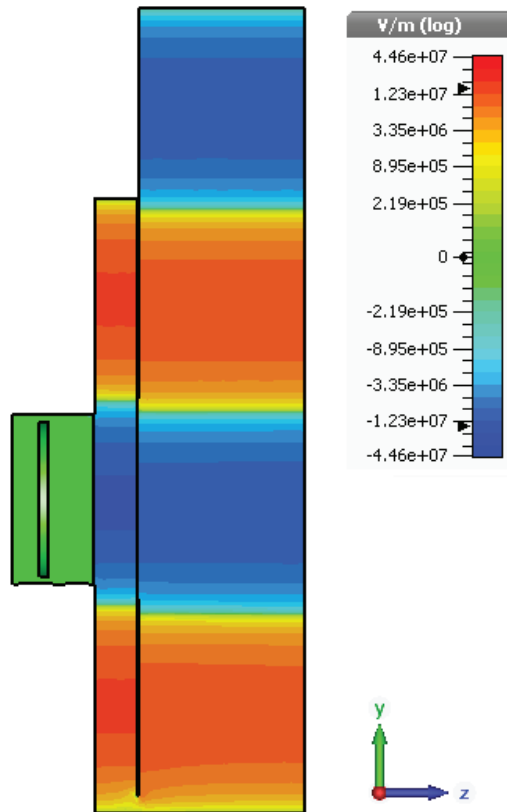


Рис. 3.6: Распределение  $z$ -компоненты электрического поля в двухзазорном резонаторе релятивистского виртода.

релятивистского электронного пучка в системе с заданными геометрическим параметрами между источником напряжения создает импульс ускоряющего напряжения между катодом и анодом величиной  $U_0 = 1.1$  МВ, длительностью 200 нс и временем нарастания 30 нс. Также важным является тот факт, что при моделировании процессов в пучке заряженных частиц не учитывался эффект ионизации.

Оценим значения первого и второго критических токов для рассматриваемой численной модели релятивистского виртода. Оценку будем проводить, рассматривая отношение прошедшего тока к току пучка  $W_{tr} = I_{tr}/I_0$  по аналогии с работой [47]. При этом, величину прошедшего тока введем как величину тока, оседающего на дальней стенке второго резонатора. Для корректного анализа величины  $W_{tr}$  будем рассматривать не отношение прошедшего тока к току пучка, а прошедшего тока к току пучка на выходе из

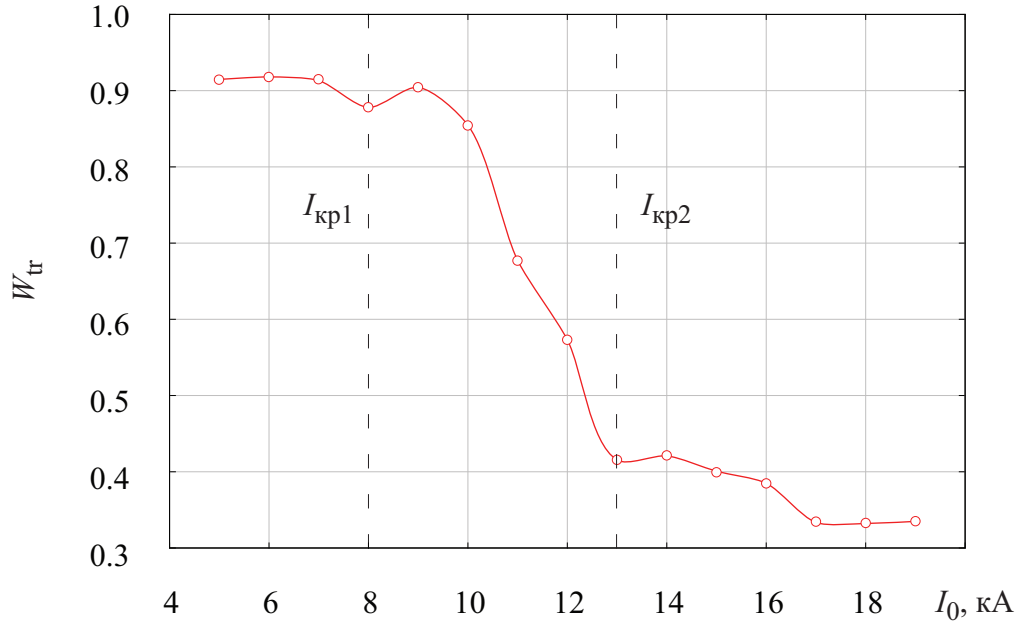


Рис. 3.7: Зависимость отношения прошедшего тока к току на выходе из пушечной части  $W_{tr} = I_{tr}/I_{gun}$  от величины тока эмиссии  $I_0$ .

электронной пушки  $I_{tr}/I_{gun}$ . Это решение обусловлено значительным оседанием частиц на стенках цилиндра, образующего пушечную часть, и отличием инжектируемого катодом тока и тока, поступающего в резонатор ( $I_{gun} < I_0$ ). Зависимость величины  $W_{tr}$  от тока пучка  $I_0$  представлена на рисунке 3.7.

Из рисунка видно, что при малых значениях эмитируемого тока  $I_0 \sim 4 \div 7$  кА, почти все частицы, вылетевшие из пушечной части пролетают через резонатор и достигают дальней стенки ( $\sim 0.92I_0$ ). Потеря оставшихся  $\sim 8\%$  частиц связана с оседанием на сетке, разделяющей первый и второй зазор, а также на стенках резонатора. Это говорит об установлении стационарного состояния пучка, которое реализуется при докритических значениях тока  $I_{gun}$ . При достижении током эмиссии величины  $I_0 = 7$  кА число прошедших частиц начинает незначительно падать. В этом случае в пучке наблюдается провисание потенциала под действием сил пространственного заряда, образуется виртуальный катод и появляются отраженные от него частицы. Образование виртуального катода и отраженных электронов связано с преодолением током эмиссии первого критического тока  $I_0 = I_{кр1}$ . На участке

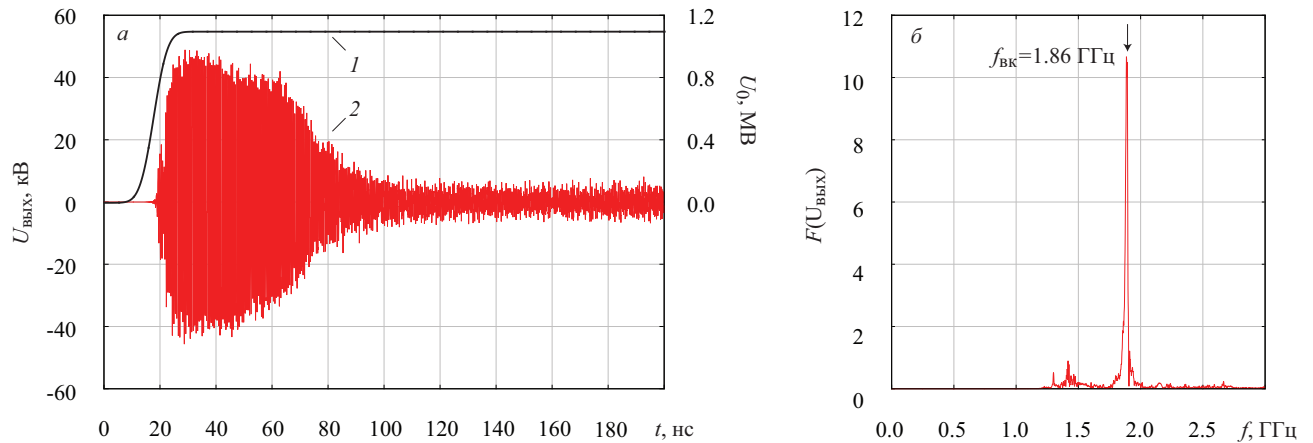


Рис. 3.8: Слева: временная реализация импульса ускоряющего напряжения (1) и колебаний выходного СВЧ излучения релятивистского виртода (2). Справа: частотный спектр колебаний выходного сигнала.

$I_0 \sim 7 \div 13$  кА наблюдается стремительное падение числа достигших дальней стенки резонатора частиц с  $0.9I_0$  до  $0.42I_0$ . На этом участке виртуальный катод является стационарным. При достижении током эмиссии  $I_0$  значения в 13 кА виртуальный катод начинает совершать колебания в пространстве и времени, и в системе реализуется режим генерации электромагнитного СВЧ излучения. Таким образом,  $I_0 = 13$  кА для данной конфигурации двухзазорного резонатора является вторым критическим током  $I_{\text{кр}2}$ . Описанное поведение пучка в системе релятивистского виртода хорошо сочетается с анализом, проведенным в работах [26, 47]. Из приведенного изучения динамики выберем в качестве рабочего тока для рассматриваемой модели релятивистского виртода значение, сильно превышающее первый критический ток и немного превышающее второй критический ток –  $I_0 = 16$  кА. Время нарастания тока выбрано равным 20 нс.

После завершения переходного процесса длительностью в 20 нс в пучке образуется нестационарный виртуальный катод, возбуждающий бегущую волну в верхней части второго зазора. С помощью выходного прямоугольного волновода, расположенного на верхней границе второго зазора, СВЧ излучение выводится из системы. При этом бегущая волна наиболее эффек-

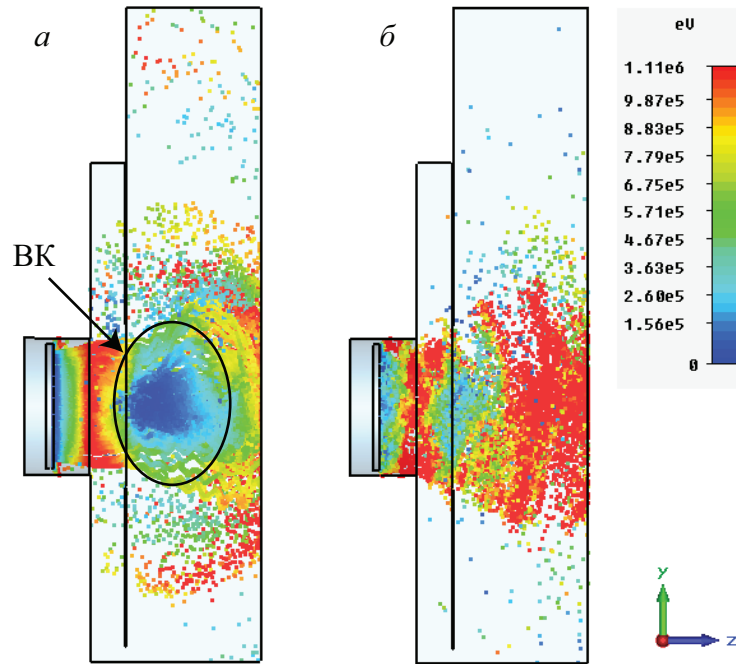


Рис. 3.9: Распределение заряженных частиц в двухзазорном релятивистском виртоде до (а) и после (б) срыва генерации в сечении  $x = 0$ .

тивно возбуждает низшую моду  $TE_{10}$  выходного прямоугольного волновода. На рисунке 3.8 представлены импульс выходного СВЧ излучения (а, кривая 2) и его частотный спектр (б). Также на рисунке 3.8 (а, кривая 1) приведена форма импульса ускоряющего напряжения. Видно, что в численном моделировании после завершения переходного процесса ускоряющее напряжение выходит на постоянный уровень в отличие от эксперимента (рисунок 3.3). Несмотря на это, форма импульса выходного СВЧ излучения, полученного в ходе численного моделирования хорошо сочетается с формой выходного сигнала, полученного при изучении экспериментальной установки релятивистского двухзазорного виртода. Также видно, что в спектр выходного излучения является узкополосным и в нем присутствует единственная мощная компонента, которая, как обсуждалось ранее, определяется геометрией первого зазора  $f = 1.86$  ГГц.

Интересно, что в численном моделировании также как и в эксперименте наблюдается срыв генерации, который в работах [47, 139] объяснялся

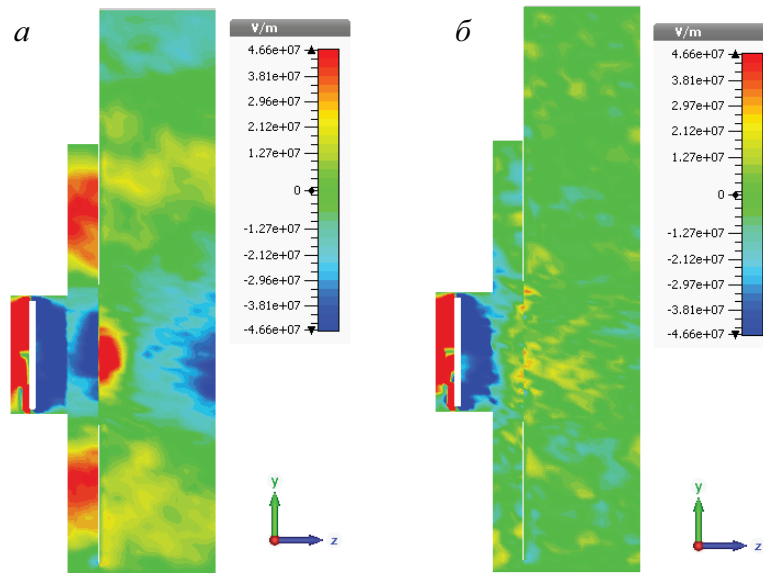


Рис. 3.10: Распределение  $z$ -компоненты напряженности электрического поля в присутствии пучка в двухззорном релятивистском виртоде до (а) и после (б) срыва генерации в сечении  $x = 0$ .

с позиций нейтрализации отрицательного пространственного заряда пучка положительными ионами, образованными в ходе существенного перегрева фольги. Однако, в ходе проведенного трехмерного численного моделирования пучка заряженных частиц в рамках CST PS не учитывается процесс ионизации, поэтому можно сделать вывод о том, что нейтрализация пучка является не единственным фактором, приводящим к срыву генерации в релятивистском двухззорном виртоде. Детальный анализ поведения пучка, показал, что в момент срыва генерации существенным образом меняется динамика заряженных частиц. На рисунке 3.9 показаны снимки пучка в плоскости  $x = 0$  до (а) и после (б) срыва генерации. До срыва генерации в пучке образуется хорошо сформированный плотный виртуальный катод во входном зазоре резонатора вблизи второй сетки. Колеблющийся плотный виртуальный катод определяет наличие импульса выходного излучения, характеризующегося большой амплитудой. После срыва генерации в пучке не образуется колеблющейся электронной структуры и электронных сгустков как таковых. Пучок представляет собой некогерентно движущиеся заря-

женные частицы, совершающие достаточно хаотическое движение в области второго зазора резонатора. Причиной такому поведению электронного потока является переключение моды колебаний электромагнитного поля в первом зазоре, вследствие прекращения возбуждения поля в первой секции за счет обратной связи (рисунок 3.10). Дело в том, что виртуальный катод смещается к области инжекции и в определенный момент покидает область второго зазора. Тогда во втором зазоре прекращаются колебания электромагнитного поля, создаваемые виртуальным катодом и, следовательно, рабочая мода колебаний в первом зазоре перестает возбуждаться. В отсутствие обратной связи в пучке перестает формироваться виртуальный катод, что приводит к срыву колебательной динамики в пучке.

Следует отдельно отметить тот факт, что изменение величины тока эмиссии не приводит к изменению частоты колебаний выходного излучения релятивистского виртода. Частота выходного сигнала является стабильной и определяется пространственными размерами первого зазора, в котором происходит предварительная скоростная модуляция пучка за счет наличия обратной связи. При этом варьировать параметры излучения можно изменяя геометрию первой секции резонатора. Результаты перестройки параметров выходного излучения релятивистского виртода приведены на рисунке 3.11. При изменении положения поршня в верхней части первого зазора изменяется длина реализующейся в зазоре стоячей волны. Следовательно, изменяется и частота выходного СВЧ излучения обратно пропорционально длине стоячей волны, установившейся в первом зазоре резонатора при выбранном положении поршня ( $f \sim 1/\lambda$ ). Действительно, частота выходного излучения снижается при удалении поршня от оси пучка. Зависимость мощности от положения поршня при этом не является монотонной функцией и имеет максимум при  $L_{1p} = 15.5$  см. Наличие максимума в зависимости выходной мощ-



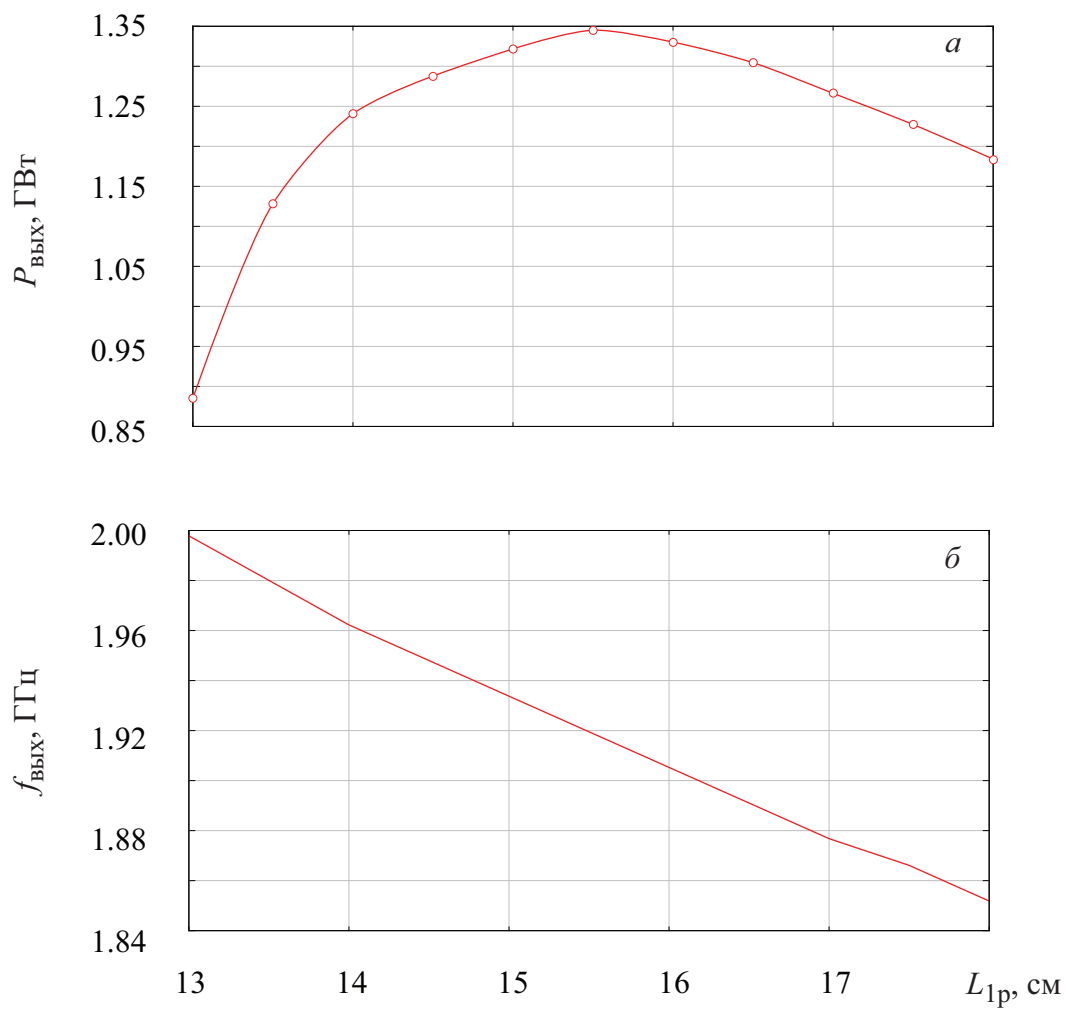


Рис. 3.11: Зависимость мощности (а) и частоты (б) выходного СВЧ излучения релятивистского виртода от положения верхнего поршня в первой секции двухзазорного резонатора. Положение поршня отсчитывалось от оси пучка (ср. с рисунком 3.4).

ности от положения верхнего поршня обусловлено тем, что при  $L_{1p} = 15.5$  см пучность поля стоячей волны находится ближе всего к оси пучка. Это означает, что при таких размерах первого зазора резонатора стоячая волна наиболее эффективно взаимодействует с пучком, обеспечивая наилучшую группировку пучка во втором резонаторе в области образования виртуального катода. Важно заметить, что полученные в ходе численного моделирования результаты отлично согласуются с результатами, полученными на экспериментальной установке (см. рисунок 3.4).

### **3.3 Усилитель СВЧ сигнала, основанный на релятивистском двухзазорном виртоде**

В настоящее время в СВЧ электронике больших мощностей важными задачами являются разработка и создание высокомошных усилителей микроволнового излучения. В особенности если такой усилитель является конечным элементом в схеме для усиления сигналов сравнительно высокой мощности. Перспективным направлением для решения данной проблемы является использование релятивистских электронных пучков с около- или сверхкритическими токами в качестве активной среды для усиления внешних сигналов.

Первоначально идея создания усилителей на основе приборов с виртуальным катодом была предложена в работе [140]. В рассмотренной в данной работе схеме виркатора-усилителя частота колебаний виртуального катода была близка к  $TM_{020}$  моде резонатора. С помощью накачки резонатора внешним управляющим сигналом возбуждалась рабочая мода  $TM_{020}$  мода резонатора до инжекции пучка и формирования в нем виртуального катода. Таким образом, высокочастотное поле резонатора, созданное внешним сигналом, начинает сразу же взаимодействовать с влетающим в резонатор интенсивным электронным пучком и навязывать ему частоту внешнего сиг-

нала. Такой процесс взаимодействия электромагнитного поля с электронным пучком оказывается очень эффективным с точки зрения образования электронной структуры. Модель виркатора-усилителя была исследована экспериментально и было показано усиление сигнала порядка 4.5 дБ.

Однако, многие вопросы, касающиеся анализа механизмов усиления и его характеристик в виркаторных системах, для создания оптимальных схем виркаторов-усилителей остаются открытыми. В данном разделе настоящей диссертационной работы в рамках трехмерного полностью электромагнитного моделирования рассмотрена модель усилителя, содержащего электронный пучок в режиме формирования виртуального катода, основанная на схеме релятивистского виртода с возможностью ввода внешнего сигнала. В подразделе 3.3.1 рассматривается конструкция виртода-усилителя. Особое внимание уделено тем особенностям схемы, которые отличают виртод-усилитель от модели классического виртода. Подраздел 3.3.2 посвящен анализу работы прибора и описанию его основных выходных характеристик.

### **3.3.1 Преобразование конструкции релятивистского виртода для ввода внешнего сигнала**

Рассмотрим схему виркатора-усилителя, приведенную на рисунке 3.12 (а). Можно заметить, что она имеет много общего с моделью классического виртода, рассмотренной ранее и подробно описанной в разделе 3.2.1. Так же как и в классической схеме виртода сплошной электронный пучок инжектируется с катода в области электронной пушки, представляющей собой цилиндрический диодный промежуток катод-анодная сетка. Между катодом и анодной сеткой поддерживается ускоряющее напряжение  $U_0 = 1.1$  МВ. Длительность импульса ускоряющего напряжения – 300 нс, а время нарастания – 10 нс. Значение тока эмиссии в рабочем режиме ( $I_0 = 16.9$  кА) было выбрано пре-

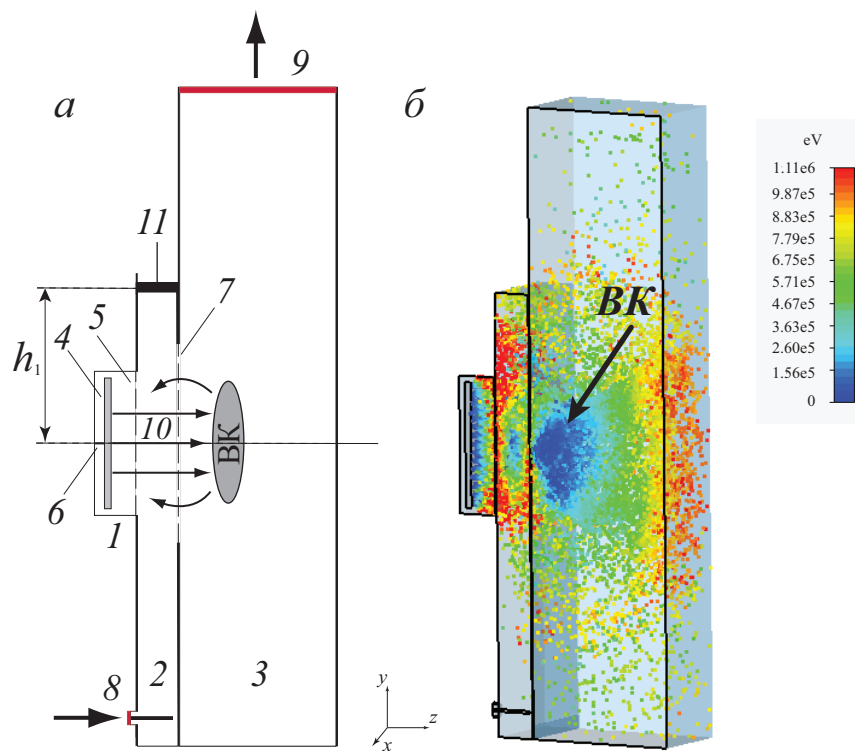


Рис. 3.12: (а) Схема предложенного виркатора-усилителя. Здесь: 1 – электронная пушка; 2 – первый зазор резонатора; 3 – второй зазор резонатора; 4 – катод; 5 – анодная сетка; 6 – устоичник ускоряющего напряжения; 7 – вторая сетка (между зазорами резонатора); 8 – входной коаксиальный волновод; 9 – выходной прямоугольный волновод; 10 – сплошной электронный поток; 11 – поршень для механической настройки геометрии первого зазора;  $h_1$  обозначает положение поршня относительно оси пучка. (б) Модель виркатора-усилителя с электронным пучком в среде CST PS в продольном сечении.

вышающим величину первого критического тока и близким ко второму критическому ( $I_{кр1} < I_0 < I_{кр2}$ ). Оценка величин критических токов для данной системы показала, что  $I_{кр1} \approx 10.5$  кА, а  $I_{кр2} \approx 17.6$ . Такой выбор рабочего тока эмиссии обусловлен тем, что для усиления в пучке должен образоваться виртуальный катод, однако он не должен совершать колебаний в отсутствие внешнего сигнала.

Главные и наиболее существенные отличия усилительной схемы виртода от его классической модели состоят в том, что в схеме виртода-усилителя отсутствует окно связи, что разделяет двухзазорный резонатор на две самостоятельные части – входной резонатор и выходной волновод, а в стенку входного резонатора встроен коаксиальный волновод для ввода внешнего усиливаемого сигнала. Удаление окна связи продиктовано в первую очередь необходимостью разделения зон предварительной скоростной модуляции пучка и формирования виртуального катода, а также разрыва цепи обратной связи. Важным параметром в данной схеме виртода усилителя является положение коаксиального волновода на стенке первого резонатора. Положение входного волновода определялось посредством встроенной в CST PS процедуры математической оптимизации исходя из условий минимизации энергии электрического поля, покидающей систему через входной волновод, и достижения максимальной эффективности взаимодействия высокочастотного поля с пучком в первом зазоре. Отметим, что потеря энергии электрического поля через входной волновод естественно приводит к снижению коэффициента усиления.

С помощью процедуры математической оптимизации были также получены следующие размерные геометрические параметры виртода-усилителя, обеспечивающие наиболее эффективную работу устройства: радиус катода – 49 мм, радиус электронной пушки – 54 мм, расстояние между

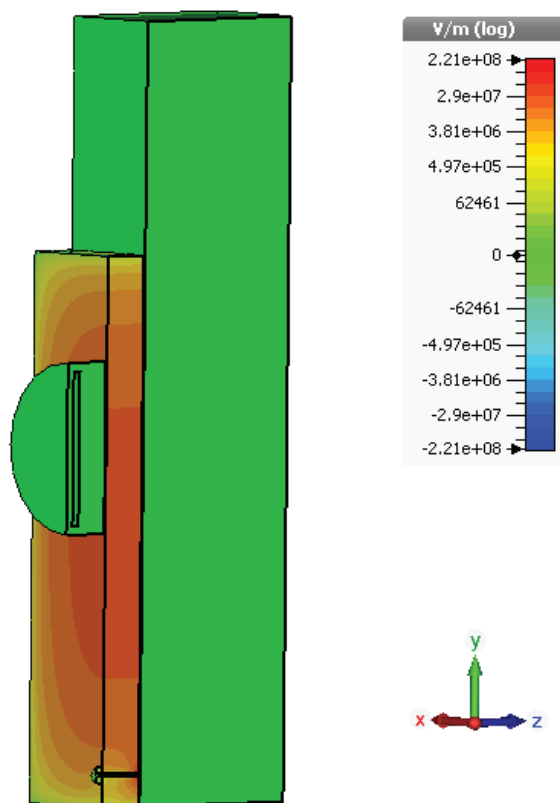


Рис. 3.13: Распределение  $z$ -компоненты напряженности электрического поля в первой секции двухзазорного резонатора. Распределение построено в сечении  $x = 0$ .

осью пучка и нижней границей зазоров – 227 мм (вдоль оси  $y$ ), расстояние между катодом и анодной сеткой – 21.5 мм, ширина резонатора – 140 мм (вдоль оси  $x$ ), высота первого резонатора – 347 мм (вдоль оси  $y$ ), которой соответствует  $h_1 = 120$  мм, расстояние между анодной сеткой и второй сеткой – 30 мм (вдоль оси  $z$ ), расстояние между второй сеткой и дальней стенкой второго зазора – 119 мм (вдоль оси  $z$ ), положение выходного прямоугольного волновода относительно оси пучка – 267 мм (вдоль оси  $y$ ), положение входного коаксиального волновода относительно нижней границы зазоров – 21 мм (вдоль оси  $y$ ), внутренний и внешний радиусы входного коаксиального волновода – 1 мм и 5 мм соответственно, длина возбуждающего штыря входного коаксиального волновода, которая находится внутри первого зазора – 28 мм.

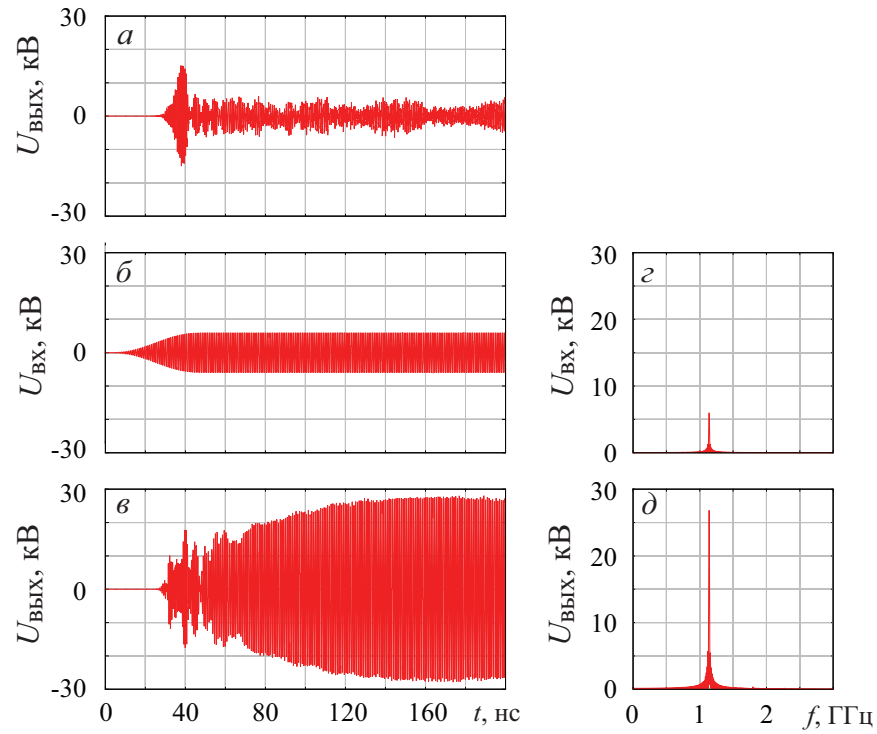


Рис. 3.14: Временные ряды и частотные спектры выходного сигнала в схеме виртода-усилителя без (а) и при наличии (в,д) внешнего воздействия (б,г). Амплитуда внешнего сигнала –  $A_{вх} = 6$  кВ, частота внешнего сигнала –  $f_{вх} = 1.14$  ГГц.

Стоит также заметить, что в случае виртода-усилителя рабочей модой первой секции двухзазорного резонатора является  $TM_{110}$ , имеющая одну вариацию поля вдоль оси  $y$  (см. рисунок 3.13). В отличие от схемы классического виртода, где в первом резонаторе при наличии обратной связи появлялась  $TM_{130}$  стоячая волна. При указанных геометрических параметрах системы реализующаяся в первом зазоре виртода-усилителя стоячая волна совершает колебания на частоте  $f = 1.14$  ГГц.

### 3.3.2 Результаты численного моделирования процессов усиления в виркаторной системе на основе релятивистского виртода

Перейдем к рассмотрению численного исследования модели усилителя на основе релятивистского виртода и анализа его выходных характеристик. На рисунке 3.14 представлены реализации и частотные спектры выходного сигнала рабочей  $TE_{10}$  моды выходного прямоугольного волновода для случая без

(3.14, а) и с (3.14, в) внешним воздействием, показанным на (3.14, б). Можно видеть, что в отсутствие внешнего сигнала исследуемая схема виртода-усилителя не демонстрирует устойчивого излучения. Исключение составляет короткий всплеск в самом начале временной реализации, который объясняется наличием переходных процессов в пучке. После срыва короткого импульса на выходе можно видеть лишь близкие к шумовым колебания со сравнительно низкой амплитудой. Это говорит о том, что в системе не развивается процесс генерации, связанный с работой в докритическом режиме (по отношению ко второму критическому току), а также за счет разрыва обратной связи из-за отсутствия окна связи. Также мы можем констатировать, что в пучке образовался стационарный виртуальный катод, а сам пучок является активной средой для усиления внешнего сигнала.

Рассмотрим теперь случай подачи внешнего сигнала. На рисунке 3.14 (б) и (в) приведены временные ряды входного и усиленного сигналов соответственно. Входной сигнал является усиленным в 4.7 раз по амплитуде на главной гармонике спектра. Как можно заметить, усиленный сигнал имеет стабильную частоту и амплитуду после завершения переходного процесса, который составляет примерно 80-120 нс, в то время как нарастание управляющего сигнала занимает 40 нс. В таком случае, двухзазорный виртод-усилитель может рассматриваться как регенеративный усилитель, как, например, лампа обратной волны, работающая при докритическом токе пучка (до границы самовозбуждения) и осуществляющая регенеративное усиление СВЧ сигнала [7, 141].

На рисунке 3.15 изображена зависимость коэффициента усиления по мощности предложенной схемы виртода-усилителя от частоты входного сигнала при фиксированной амплитуде внешнего воздействия. Можно видеть, что предложенная модель является узкополосным усилителем с шириной



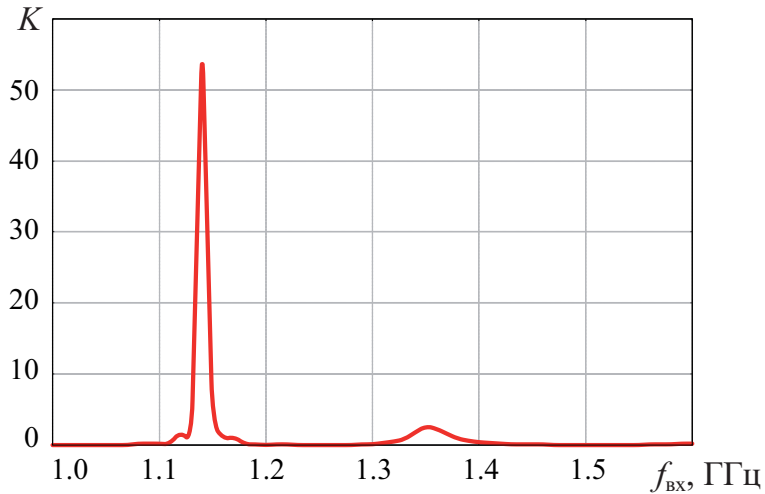


Рис. 3.15: Зависимость коэффициента усиления по мощности  $K$  от частоты внешнего сигнала  $f_{\text{вх}}$ . Амплитуда внешнего сигнала  $A_{\text{вх}} = 0.5$  кВ.

$X \sim 0.6\%$ , при том, что величина  $K$  принимает максимальное значение при  $f_{\text{вх}} = 1.14$  ГГц, согласно рисунку 3.15. Эта частота определяется рабочей  $TM_{110}$  модой первой секции двухзазорного резонатора (см. рисунок 3.13), и при подаче внешнего сигнала на частоте данной рабочей моды, поле наиболее эффективно взаимодействует с проходящим через первый зазор релятивистским электронным пучком. С физической точки зрения это означает, что ввод внешнего сигнала в систему и определяемая им предварительная скоростная модуляция электронного потока переключает систему в режим формирования развитого колеблющегося виртуального катода во втором зазоре резонатора, что приводит к усилению входного сигнала. Второй (меньший) пик на зависимости  $K(f_{\text{вх}})$  соответствующий частоте  $f_{\text{вх}} \approx 1.35$  ГГц определяется возбуждением моды  $TM_{120}$  первого зазора. При этом эффективность взаимодействия этой моды с релятивистским потоком является достаточно низкой в рассматриваемой модели виртода-усилителя. Узкий диапазон эффективно усиливаемых частот является сильной стороной исследуемого виртода-усилителя, который позволяет также снизить эффекты, оказываемые шумами электронного потока, которые возникают при работе с интенсивными электронными пучками с виртуальным катодом [141].

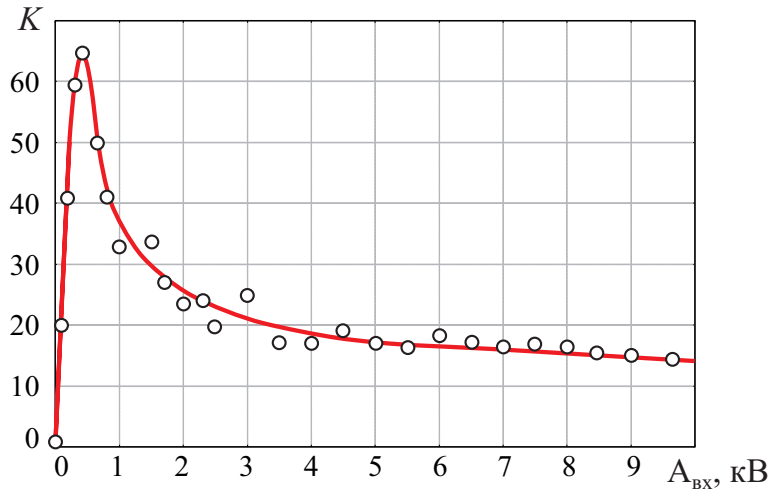


Рис. 3.16: Зависимость коэффициента усиления по мощности  $K$  от частоты внешнего сигнала  $f_{\text{вх}}$ . Частота внешнего воздействия  $f_{\text{вх}} = 1.14$  ГГц.

Для анализа влияния амплитуды входного сигнала на работу виртода-усилителя была построена зависимость коэффициента усиления по мощности от амплитуды внешнего воздействия  $K(A_{\text{вх}})$  при работе на частоте рабочей моды  $f_{\text{вх}} = 1.14$  ГГц. Полученная зависимость приведена на рисунке 3.16. Оптимальное значение амплитуды внешнего усиливаемого сигнала, при котором коэффициент усиления мощности является максимальным  $K \approx 65$ , составляет  $A_{\text{вх}} = 0.5$  кВ. При амплитудах внешнего сигнала  $A_{\text{вх}} < 0.5$  кВ внешнее воздействие не способно осуществить достаточную модуляцию релятивистского электронного пучка в первом зазоре, вследствие чего коэффициент усиления  $K$  испытывает значительное падение. Ввод более мощного сигнала  $A_{\text{вх}} > 0.5$  кВ в рассматриваемую усилительную систему, приводит к перемодуляции электронного потока, которая негативно сказывается на формировании виртуального катода и также приводит к снижению коэффициента усиления. Тем не менее, нежелательные эффекты, отрицательно влияющие на величину коэффициента усиления стабилизируются при  $A_{\text{вх}} = 4.0$  кВ и коэффициент усиления выходит на насыщение  $K \approx 15$  (см. рисунок 3.16).

Не смотря на то, что предложенная модель виртода-усилителя обладает узкой полосой эффективно усиливаемых частот, существует возможность

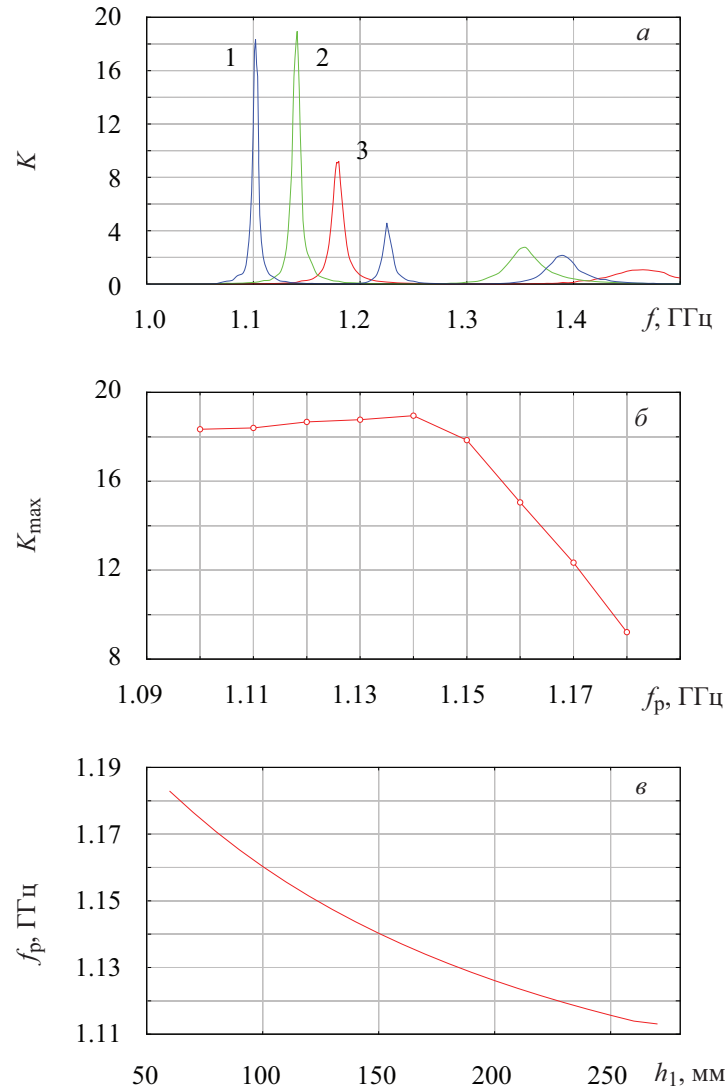


Рис. 3.17: (а) Зависимости коэффициента усиления по мощности  $K$  от частоты внешнего сигнала  $f_{вх}$  при различных положениях настроечного поршня: кривая 1 –  $h_1 = 270$  мм; кривая 2 –  $h_1 = 120$  мм; кривая 3 –  $h_1 = 60$  мм. (б) Зависимость рабочей частоты виртода-усилителя  $f_p$  от положения поршня относительно оси пучка  $h_1$ . (в) Зависимость максимального коэффициента усиления  $K_{max}$  от рабочей частоты  $f_p$ .

варьировать рабочую частоту прибора в более широком диапазоне с помощью механической настройки размеров первой секции резонатора по аналогии с перестройкой частоты в базовой модели релятивистского виртода (раздел 3.2). Иллюстрация возможности перестройки частоты приведена на рисунке 3.17 (а), где показана зависимость  $K(f_{\text{вх}})$  для трех различных положений поршня, определяющих высоту первого зазора. Изменение геометрических размеров первой секции двухзазорного резонатора приводит к варьированию частоты рабочей моды и соответственно к настройке рабочей частоты усилителя – чем больше высота первого зазора, тем ниже частота (см. рисунок 3.17 (б)). В силу того, что положение поршня относительно оси пучка не может принимать значение меньше, чем радиус электронной пушки, то это вносит ограничение на максимально возможную рабочую частоту. Проведенные исследования показывают, что перестройка рабочей частоты виртода-усилителя за счет механического изменения положения поршня составляет примерно 8 – 10% относительно главной частоты 1.14 ГГц. Вместе с тем, максимальный коэффициент усиления на рабочей частоте существенно не изменяется при  $f_{\text{вх}} < 1.15$  ГГц. Падение коэффициента усиления обусловлено тем, что при тех геометрических параметрах первого зазора, когда рабочая частота  $f_p > 1.15$  ГГц, пучность рабочей моды поля в первом зазоре существенно удалена от оси пучка и поле неэффективно взаимодействует с электронным потоком.

Однако, в силу того, что рабочая частота релятивистского виртода и основанного на этой схеме виртода-усилителя полностью определяется геометрией резонатора, рассматриваемый усилительный прибор может быть легко перестроен для работы в более высоком диапазоне частот за счет уменьшения его характерных размеров. При этом, все описанные физические ме-

ханизмы, приводящие к усилению СВЧ сигналов, остаются прежними и не изменяются при уменьшении размеров прибора.

### 3.4 Выводы

В рамках данной главы настоящей диссертационной работы было проведено полномасштабное трехмерное полностью электромагнитное численное моделирование процессов в пучке, протекающих в релятивистском виртоде. Разработанная численная модель релятивистского виртода показала хорошее согласие с известными экспериментальными результатами. Важно отметить, что результаты, полученные в ходе численного моделирования дополнили экспериментальные данные. В частности, численное моделирование позволило выявить механизм срыва генерации в релятивистском виртоде, связанный с переключением моды колебаний электромагнитного поля в первой секции двухззорного резонатора, без учета процессов ионизации.

Также с использованием знаний о физических механизмах, приводящих к повышению выходной мощности в приборах, содержащих интенсивные электронные потоки в режиме формирования виртуального катода, которые были получены в главах 1 и 2 настоящей диссертационной работы, была разработана схема для усиления высокомоуных СВЧ сигналов. Схема предложенного прибора, основанная на модели релятивистского виртода, сохраняет все ключевые положительные особенности базовой модели: простота конструкции, работа без приложения внешнего магнитного поля, низкая требовательность к параметрам инжектируемого пучка. Проведенные изучения аспектов работы виртода-усилителя в рамках данной главы диссертационного исследования показывают, что предложенная схема усилителя на виртуальном катоде может рассматриваться как перспективный усилитель СВЧ сигнала высокого уровня мощности с возможностью механической настрой-

ки рабочей частоты усиления. Описанная модель усилителя характеризуется максимальным коэффициентом усиления порядка 18 дБ и средним коэффициентом усиления порядка 12 дБ, что позволяет говорить о перспективах использования данного прибора в качестве конечного усилителя сигнала высокой мощности.

## Заключение

В настоящей диссертационной работе проведено детальное исследование влияния внешнего воздействия на процессы образования, нелинейную нестационарную динамику виртуального катода в электронном потоке со сверхкритическим током и выходные характеристики виркатора. В диссертационной работе рассмотрены различные схемы неавтономных генераторов на виртуальном катоде, в том числе с нерелятивистскими и релятивистскими пучками, а также проведена математическая оптимизация рассмотренных систем с целью достижения оптимальных характеристик выходного излучения. Выявлены и подробно изложены основные физические эффекты, возникающие при вводе внешнего сигнала в виркаторные системы посредством предварительной скоростной модуляции пучка.

Полученные в диссертации результаты имеют фундаментальную значимость с точки зрения понимания таких проблем как неавтономная динамика пространственно-распределенных пучково-плазменных систем и синхронизация связанных нелинейных активных сред. Также полученные в диссертации результаты имеют большое прикладное значение, т.к. в ходе проведенной работы были предложены механизмы увеличения выходной мощности и КПД генераторов на виртуальном катоде, а также продемонстрирован эффективный подход к созданию усилителя на основе релятивистского электронного потока с виртуальным катодом.

Основные результаты работы.

1. Изучены вопросы увеличения мощности выходного СВЧ излучения при воздействии внешним сигналом на генератор на виртуальном катоде в рамках одномерной модели нерелятивистского электронного пучка в системе с дополнительным торможением потока (низковольтный виркатор). Возможность роста выходной мощности за счет предварительной скоростной модуляции потока на частоте внешнего гармонического сигнала была выявлена в простой стационарной теоретической модели. Для проведения более детального исследования была разработана одномерная численная модель, основанная на методе крупных частиц. Данный подход был основан на самосогласованном решении нерелятивистских уравнений движения крупных частиц и решении уравнения Пуассона для определения значений электрического поля в узлах пространственной сетки. Результаты исследования неавтономной динамики нерелятивистского виркатора, полученные в рамках одномерного численного моделирования, хорошо согласуются с результатами стационарной теоретической модели. Увеличение мощности также было обнаружено и при однонаправленном воздействии ведущего генератора на виртуальном катоде на ведомый (цепочка низковольтных виркаторов). При этом, по аналогии со случаем воздействия внешним сигналом наиболее эффективное увеличение мощности наблюдается при близкой настройке управляющих параметров взаимодействующих систем.

Дано объяснение увеличению выходной мощности была с позиций установления режима синхронизации временных масштабов – показано, что рост мощности при взаимодействии однонаправленно связанных генераторов на виртуальном катоде возникает, когда большая часть энергии вейвлетного спектра приходится на диапазон синхронных временных масштабов. Помимо синхронизации временных масштабов была диагностирована возможность установления ещё одного важного и интересного типа хаотической синхрони-



зации – обобщенной синхронизации. В ходе исследования данного вопроса была изучена прикладная значимость проведенного исследования: было показано, что генераторы на виртуальном катоде могут выступать в качестве активных модулей в схемах скрытой передачи данных, основанной на явлении обобщенной синхронизации.

2. Проведено детальное численное моделирование динамики интенсивного электронного потока в низковольтном генераторе на виртуальном катоде в рамках полностью электромагнитной трехмерной *particle-in-cell* модели. Были найдены условия для формирования в исследуемой низковольтной виркаторной системе нестационарного колеблющегося виртуального катода: определены оптимальные геометрические параметры компонент схемы виркатора, а также обнаружено значение критического тока, при превышении которого в пучке образуется плотный электронный сгусток.

Помимо этого была проведена модификация автономной схемы низковольтного виркатора с целью возможности ввода внешнего сигнала и оказания воздействия на пучок. Для этого в пушечной части было создано пространство предварительной скоростной модуляции пучка, ограниченное анодной сеткой и входной сеткой пространства дрейфа. Внешний СВЧ сигнал вводился в пространство дрейфа с помощью коаксиального волновода, центральная жила которого была соединена с витком модулирующей спирали. Поле спирали оказывало воздействие на пучок на частоте внешнего управляющего сигнала.

Было проведено изучения возможности контроля выходными характеристиками прибора за счет управления динамикой пучка внешним сигналом. В частности исследованы зависимости мощности и частоты выходного сигнала от уровня мощности и частоты внешнего воздействия. Показано качественное совпадение полученных результатов с результатами одномерного

численного моделирования пучка, приведенными в предыдущей главе. Как и ранее, система демонстрирует рост выходной мощности при увеличении мощности внешнего воздействия на частотах, близких к собственным частотам колебаний виртуального катода. Помимо этого, результаты численного моделирования хорошо сочетаются с экспериментальными данными, полученными при изучении неавтономной динамики низковольтного генератора на виртуальном катоде научной группой под руководством профессора Ю.А. Калинина. Это свидетельствует о корректности построенных численных моделей и справедливости проведенных аналитических оценок и результатах численного моделирования.

3. Проведено полномасштабное трехмерное полностью электромагнитное численное моделирование процессов в пучке, протекающих в релятивистском виртоде. Разработанная численная модель релятивистского виртода показала хорошее согласие с известными экспериментальными результатами. Важно отметить, что результаты, полученные в ходе численного моделирования дополнили экспериментальные данные. В частности, численное моделирование позволило выявить механизм срыва генерации в релятивистском виртоде, связанный с переключением моды колебаний электромагнитного поля в первой секции двухзазорного резонатора, без учета процессов ионизации.

Также с использованием знаний о физических механизмах, приводящих к повышению выходной мощности в приборах, содержащих интенсивные электронные потоки в режиме формирования виртуального катода, которые были получены в главах 1 и 2 настоящей диссертационной работы, была разработана схема для усиления высокомоуных СВЧ сигналов. Схема предложенного прибора, основанная на модели релятивистского виртода, сохраняет все ключевые положительные особенности базовой модели: простота конструкции, работа без приложения внешнего магнитного поля, низкая тре-

бовательность к параметрам инжектируемого пучка. Проведенные изучения аспектов работы виртода-усилителя в рамках данной главы диссертационного исследования показывают, что предложенная схема усилителя на виртуальном катоде может рассматриваться как перспективный усилитель СВЧ сигнала высокого уровня мощности с возможностью механической настройки рабочей частоты усиления. Описанная модель усилителя характеризуется максимальным коэффициентом усиления порядка 18 дБ и средним коэффициентом усиления порядка 12 дБ, что позволяет говорить о перспективах использования данного прибора в качестве конечного усилителя сигнала высокой мощности.

*В заключение выражаю глубокую признательность своим научным руководителям профессору, д.ф.-м.н. Храмову Александру Евгеньевичу и доценту, к.ф.-м.н. Куркину Семену Андреевичу за результативное многолетнее сотрудничество, интенсивную работу, а также за всестороннюю помощь и поддержку при подготовке данной диссертационной работы. Особенно хочу поблагодарить профессора Короновского Алексея Александровича и доцента Москаленко Ольгу Игоревну за их бесценные научные советы, отзывчивость и помощь, которые помогли мне при проведении научной работы и подготовке данной диссертационной работы. Искренне благодарю профессора Юрия Александровича Калинина за плодотворные обсуждения и сотрудничество при проведении совместных научных работ, а также всех своих коллег за помощь и поддержку на различных этапах выполнения данной работы.*

# Литература

- [1] А.А. Кураев, Мощные приборы СВЧ: Методы анализа и оптимизации параметров, М.: Радио и связь, 1986.
- [2] V. L. Granatstein, I. Alexeeff, High Power Microwave Sources, Artech House Microwave Library, 1987.
- [3] S. H. Gold, G. S. Nusinovich, Review of high-power microwave source research, Review of Scientific Instruments 68 (11) (1997) 3945–3974.
- [4] R. J. Barker, E. Schamiloglu, High-Power Microwave Sources and Technologies, New York: IEEE Press, 2001.
- [5] Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков, В 2-х томах. М.: Физматлит, 2003.
- [6] R. J. Barker, J. H. Booske, N. C. Luhmann, G. S. Nusinovich, Modern Microwave and Millimeter-Wave Power Electronics, Wiley, New York, 2005.
- [7] S. E. Tsimring, Electron beams and microwave vacuum electronics, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
- [8] J. Benford, J. A. Swegle, E. Schamiloglu, High Power Microwaves, CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
- [9] J. H. Booske, Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation, Physics of Plasmas 15 (5) (2008) 055502.
- [10] R. C. Davidson, Theory of Nonneutral Plasmas, W.A. Benjamin Inc., Advanced book program, 1974.
- [11] М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе, Электродинамика плотных электронных пучков в плазме, М.: Наука, 1990.

- [12] М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе, П.С. Стрелков, Плазменная релятивистская СВЧ-электроника, М.: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
- [13] А.А. Короновский, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, Методы нелинейной динамики и хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2. Нестационарные и хаотические процессы, М.: Физматлит, 2009.
- [14] М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков, Введение в теорию колебаний и волн, М.–Ижевск: РХД, 2000.
- [15] Н.М. Рыскин, Д.И. Трубецков, Нелинейные волны, серия “Современная теория колебаний и волн”, М.: Физматлит, 2001.
- [16] Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов, Современные проблемы нелинейной динамики, М.: Эдиториал УРСС, 2000.
- [17] D. Walgraef, Spatio-temporal pattern formation, N. Y.: Springer-Verlag, 1996.
- [18] В.С. Анищенко, В.В. Астахов, Т.Е. Вадивасова, . др., Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах, М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.
- [19] T. Klinger, C. Schroder, D. Block, F. Greiner, A. Piel, G. Bonhomme, V. Naulin, Chaos control and taming of turbulence in plasma devices, Phys.Plasmas 8 (5) (2001) 1961–1968.
- [20] В.Д. Селемир, Б.В. Алёхин, В.Е. Ватрунин, А.Е. Дубинов, Н.В. Степанов, О.А. Шамро, К.В. Шибалко, Теоретические и экспериментальные исследования СВЧ-приборов с виртуальным катодом, Физика плазмы 20 (7,8) (1994) 689.
- [21] А.А. Кураев, Д.И. Трубецков, Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 1: Стационарные процессы., М.: Физматлит, 2009.
- [22] А.Н. Диденко, Я.Е. Красик, С.Ф. Перелыгин, Г.П. Фоменко, Генерация мощного СВЧ-излучения релятивистским электронным пучком в триодной системе, Письма в ЖТФ 5 (6) (1979) 321.
- [23] R. A. Mahaffey, P. A. Sprangle, J. Golden, C. A. Kapetanacos, High-power microwaves from a non-isochronous reflecting electron system, Phys.Rev.Lett 39 (13) (1977) 843.

- [24] D. J. Sullivan, J. E. Walsh, E. A. Coutsiyas, Virtual cathode oscillator (vircator) theory, granatstein, v.l. and alexeff, i. Edition, Vol. 13 of High Power Microwave Sources, Artech House Microwave Library, 1987.
- [25] А.Н. Диденко, А.Г. Жерлицын, А.С. Сулакшин, . др., Генерация мощного СВЧ-излучения в триодной системе сильноточным пучком микросекундной длительности, Письма в ЖТФ 9 (24) (1983) 48.
- [26] V. S. Voronin, Y. T. Zozulya, A. N. Lebedev, Self-consistent stationary state of a relativistic electron beam in a drift space, Sov. Phys.—Tech. Phys. 17 (3) (1972) 432–436.
- [27] H. Sze, J. Benford, t. l. T. Young, A radially and axially extracted virtual cathode oscillator (vircator), IEEE Trans. Plasma Sci. 15 (6) (1985) 592.
- [28] J. Benford, D. Price, H. Sze, D. Bromley, Interaction of a vircator microwave generator with an enclosing resonant cavity, Journal of Applied Physics 61 (5) (1987) 2098–2100.
- [29] А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир, Электронные приборы с виртуальным катодом, РЭ 47 (6) (2002) 575.
- [30] В.Г. Анфиногентов, Хаотические колебания в электронном потоке с виртуальным катодом, Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика 2 (5) (1994) 69.
- [31] В.Г. Анфиногентов, Нелинейная динамика электронного потока с виртуальным катодом в ограниченном пространстве дрейфа, Изв. вузов. Радиофизика 38 (3/4) (1995) 268.
- [32] В.Г. Анфиногентов, А.Е. Храмов, Сложное поведение электронного потока с виртуальным катодом и генерация хаотических сигналов в виртодных системах, Изв. РАН, сер. физич. 61 (12) (1997) 2391–2401.
- [33] В.Г. Анфиногентов, А.Е. Храмов, К вопросу о механизме возникновения хаотической динамики в вакуумном СВЧ генераторе на виртуальном катоде, Изв.вузов. Радиофизика XLI (9) (1998) 1137–1146.
- [34] В.Г. Анфиногентов, А.Е. Храмов, Исследование колебаний в электронном потоке с виртуальным катодом в виркаторе и виртоде, Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика 7 (2,3) (1999) 33–55.

- [35] А.П. Привезенцев, Н.И. Саблин, Н.М. Филипенко, Г.П. Фоменко, Нелинейные колебания виртуального катода в триодной системе, Радиотехника и электроника 37 (7) (1992) 1242.
- [36] А.П. Привезенцев, Г.П. Фоменко, Сложная динамика потока заряженных частиц с виртуальным катодом, Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика 2 (5) (1994) 56.
- [37] Н.Н. Гадецкий, И.И. Магда, С.И. Найстетер, Ю.В. Прокопенко, В.И. Чумаков, Генератор на сверхкритическом токе РЭП с управляемой обратной связью — виртод, Физика плазмы 19 (4) (1993) 530.
- [38] А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир, Управление спектром генерации виркатора с помощью внешнего СВЧ-сигнала, Письма в ЖТФ 26 (13) (2000) 17–22.
- [39] А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир, Особенности СВЧ генерации в виркаторе с неоднородным магнитным полем в области взаимодействия, Письма в ЖТФ 27 (13) (2001) 64–69.
- [40] А.Е. Дубинов, И.А. Ефимова, И.Ю. Корнилова, С.К. Сайков, В.Д. Селемир, В.П. Тараканов, Нелинейная динамика электронных пучков с виртуальным катодом, ФЭЧАЯ 35 (2) (2004) 462.
- [41] Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Е.Н. Егоров, Р.А. Филатов, Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом, Физика плазмы 31 (11) (2005) 1009–1025.
- [42] Ю.А. Калинин, С.А. Куркин, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, СВЧ-генераторы хаотических колебаний на основе электронных пучков с виртуальным катодом, Успехи современной радиоэлектроники (9) (2008) 53–55.
- [43] Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Широкополосные генераторы хаотических колебаний на турбулентных электронных потоках с внутренней электронной обратной связью, ЖТФ 80 (12) (2010) 80–85.
- [44] M. V. Fazio, R. F. Hoeberling, J. Kinross-Wright, Narrow-band microwave generation from an oscillating virtual cathode in a resonant cavity, Journal of Applied Physics 65 (3) (1989) 1321–1327.

- [45] R. F. Hoeberling, M. V. Fazio, Advances in virtual cathode microwave sources, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility* 34 (3) (1992) 252–258.
- [46] S. A. Kitsanov, A. I. Klimov, S. D. Korovin, I. K. Kurkan, I. V. Pegel, S. D. Polevin, A vircator with electron beam premodulation based on high-current repetitively pulsed accelerator, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 30 (1) (2002) 274–285.
- [47] A. S. Shlapakovski, T. Queller, Y. Bliokh, Y. E. Krasik, Investigations of a double-gap vircator at sub-microsecond pulse durations, *IEEE Transactions on Plasma Sciences* 40 (6) (2012) 1607–1617.
- [48] K. R. Clements, R. D. Curry, R. Druce, W. Carter, M. Kovac, J. Benford, K. McDonald, Design and operation of a dual vircator hpm source, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 20 (4) (2013) 1085–1092.
- [49] S. A. Kurkin, A. E. Hramov, A. A. Koronovskii, Microwave radiation power of relativistic electron beam with virtual cathode in the external magnetic field, *Applied Physics Letters* 103 (043507).
- [50] H. Matsumoto, H. Yokoyama, D. Summers, Computer simulations of the chaotic dynamics of the Pierce beam–plasma system, *Phys. Plasmas* 3 (1) (1996) 177.
- [51] Y.-W. Fan, H.-H. Zhong, Z.-Q. Li, T. Shu, J.-D. Zhang, J. Zhang, X.-P. Zhang, J.-H. Yang, L. Luo, A double-band high-power microwave source, *Journal of Applied Physics* 102 (10) (2007) 103304.
- [52] Е.Н. Егоров, Ю.А. Калинин, Ю.И. Левин, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, Вакуумные генераторы широкополосных хаотических колебаний на основе нерелятивистских электронных пучков с виртуальным катодом, *Изв. РАН, сер. физич.* 69 (12) (2005) 1724.
- [53] Р.А. Филатов, А.Е. Храмов, Д.И. Трубецков, Исследование генерации хаотических радиоимпульсов виртуальным катодом в низковольтном виркаторе, *Электронные волны и электромагнитные системы* 10 (12) (2007) 20–25.
- [54] Е.Н. Егоров, Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Исследование зависимости мощности СВЧ-генерации низковольтного виркатора от управляющих параметров, *ЖТФ* 77 (10) (2007) 139–142.



- [55] R. A. Filatov, A. E. Hramov, Y. P. Bliokh, A. A. Koronovskii, J. Felsteiner, Influence of background gas ionization on oscillations in a virtual cathode with a retarding potential, *Physics of Plasmas* 16 (3) (2009) 033106.
- [56] G. Singh, C. Shashank, Particle-in-cell simulations for virtual cathode oscillator including foil ablation effects, *Physics of Plasmas* 18 (2011) 063104.
- [57] Z. Yang, G. Liu, H. Shao, J. Sun, Y. Zhang, H. Ye, M. Yang, Numerical simulation study and preliminary experiments of a coaxial vircator with radial dual-cavity premodulation, *Plasma Science, IEEE Transactions on* 41 (12) (2013) 3604–3610.
- [58] S. A. Kurkin, A. A. Badarin, A. A. Koronovskii, A. E. Hramov, Higher harmonics generation in relativistic electron beam with virtual cathode, *Physics of Plasmas* 21 (9) (2014) 093105.
- [59] B. M. Kovalchuk, S. D. Polevin, R. V. Tsygankov, A. A. Zherlitsyn, S-band coaxial vircator with electron beam premodulation based on compact linear transformer driver, *IEEE Transactions on Plasma Science* 38 (10) (2010) 2819–2824.
- [60] Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Л.Н. Волкова, Сверхширокополосные генераторы шумоподобных высокочастотных и сверхвысокочастотных колебаний с электронной обратной связью, *Письма в ЖТФ* 36 (3) (2010) 39–44.
- [61] Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Экспериментальное исследование влияния внешнего шумоподобного сигнала на динамику виркатора с магнетронно-инжекторной пушкой., *Письма в ЖТФ* 37 (23) (2011) 34–38.
- [62] C. Moller, M. Elfsberg, A. Larsson, S. E. Nyholm, Experimental studies of the influence of a resonance cavity in an axial vircator, *IEEE Transactions on Plasma Science* 38 (6) (2010) 1318–1324.
- [63] V. Baryshevsky, A. Gurinovich, P. Molchanov, S. Anishchenko, E. Gurnevich, 2-d simulation and experimental investigation of an axial vircator, *IEEE Transactions on Plasma Science* 41 (10) (2013) 2712–2716.
- [64] R. Verma, R. Shukla, S. K. Sharma, P. Banerjee, R. Das, P. Deb, T. Prabakaran, B. Das, E. Mishra, B. Adhikary, K. Sagar, M. Meena, A. Shyam, Characterization of high power microwave radiation by an axially extracted vircator, *Electron Devices, IEEE Transactions on* 61 (1) (2014) 141–146.

- [65] В.Я. Кислов, В.В. Кислов, Новый класс сигналов для систем коммуникации: широкополосные хаотические сигналы, Радиотехника и электроника 42 (8) (1997) 973–982.
- [66] Н.Н. Залогин, В.В. Кислов, Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах, М.: Радиотехника, 2006.
- [67] А.С. Дмитриев, А.И. Панас, Динамический хаос: новые носители информации для систем связи, М.: Физматлит, 2002.
- [68] V. Dronov, M. R. Hendrey, T. M. Antonsen, E. Ott, Communication with a chaotic traveling wave tube microwave generator, Chaos 14 (1) (2004) 30.
- [69] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации, Успехи физических наук 179 (12) (2009) 1281–1310.
- [70] А.Е. Дубинов, И.Ю. Корнилова, В.Д. Селемир, Коллективное ускорение ионов в системах с виртуальным катодом, УФН 172 (11) (2002) 1225–1246.
- [71] А.Е. Храмов, О влиянии обратной связи на характеристики генерации прибора с виртуальным катодом, Радиотехника и электроника 44 (1) (1999) 116–117.
- [72] А.Е. Храмов, Колебания в системе связанных генераторов на виртуальном катоде виртодного типа, Радиотехника и электроника 44 (2) (1999) 211–217.
- [73] С.А. Куркин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Е.Н. Егоров, Р.А. Филатова, И.И. Магда, О.Г. Мележик, Трехмерное численное моделирование виртода с тороидальными резонаторами, Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика 20 (5) (2012) 121–136.
- [74] W. Woo, J. Benford, D. Fittinghoff, B. Harteneck, D. Price, R. Smith, H. Sze, Phase locking of high-power microwave oscillator, J.Appl.Phys. 65 (2) (1989) 861.
- [75] Ю.А. Калинин, И.С. Ремпен, А.Е. Храмов, Влияние внешнего сигнала на колебания в электронном потоке с виртуальным катодом (эксперимент и численное исследование), Изв. РАН, сер. физич. 69 (12) (2005) 1736–1740.
- [76] H. Sze, D. Price, B. Harteneck, N. Cooksey, A master-oscillator-driven phase-locked vircator array, Journal of Applied Physics 68 (7).

- [77] H. Sze, D. Price, B. Harteneck, Phase locking of two strongly coupled vircators, *J.Appl.Phys.* 67 (5) (1990) 2278–2282.
- [78] G. VanWiggeren, R. Roy, Communication with chaotic lasers, *SCIENCE* 279 (5354) 1198–1200.
- [79] K. Murali, M. Lakshmanan, Secure communication using a compound signal from generalized synchronizable chaotic systems, *PHYSICS LETTERS A* 241 (6) 303–310.
- [80] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, П.В. Попов, А.Е. Храмов, Способ скрытой передачи информации, основанный на явлении обобщенной синхронизации, *Известия РАН. Серия физическая* 72 (1) (2008) 143–147.
- [81] O. I. Moskalenko, A. A. Koronovskii, A. E. Hramov, Generalized synchronization of chaos for secure communication: Remarkable stability to noise, *Phys. Lett. A* 374 (2010) 2925–2931.
- [82] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.Е. Храмов, Скрытая передача информации на основе режима обобщенной синхронизации в присутствии шумов, *Журнал технической физики* 80 (4) (2010) 1–8.
- [83] Ю.А. Калинин, А.Е. Храмов, Экспериментальное исследование влияние внешнего сигнала на СВЧ-колебания в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом, *Письма в ЖТФ* 32 (13) (2006) 88–94.
- [84] Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Исследование характеристик генерации в цепочке однонаправленно связанных низковольтных виркаторов, *Изв. РАН. Сер. физическая* 75 (12) (2012) 1697–1700.
- [85] Н.С. Фролов, Динамика электронного потока с виртуальным катодом в низковольтном виркаторе под внешним гармоническим воздействием, *Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика* 20 (3) (2012) 152–159.
- [86] Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Теоретический и экспериментальный анализ мощности СВЧ излучения генератора на виртуальном катоде под внешним гармоническим воздействием, *Изв. РАН. Сер. физическая* 76 (12) (2012) 1485–1488.

- [87] С.А. Куркин, А.Е. Храмов, А.А. Короновский, . . . Сельский, Н.С. Фролов, В.В. Макаров, Условия формирования виртуального катода в релятивистском электронном потоке, Прикладная радиоэлектроника 11 (4) (2012) 489–497.
- [88] O. I. Moskalenko, N. S. Phrolov, A. A. Koronovskii, A. E. Hramov, Synchronization in the network of chaotic microwave oscillators, Eur. Phys. J. Special Topics 222 (2013) 2571–2582.
- [89] Н.С. Фролов, В.А. Максименко, К. Ильенко, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Применение спектра показателей Ляпунова для анализа динамики пучково-плазменных систем, моделируемых с помощью метода крупных частиц, Изв. РАН. Сер. физическая 78 (2) (2014) 237–240.
- [90] А.А. Короновский, О.И. Москаленко, А.С. Павлов, Н.С. Фролов, А.Е. Храмов, Обобщенная синхронизация в случае воздействия хаотического сигнала на периодическую систему, Журнал технической физики 84 (5) (2014) 1–8.
- [91] N. S. Phrolov, A. A. Koronovskii, Y. Kalinin, S. A. Kurkin, A. E. Hramov, The effect of an external signal on output microwave power of a low-voltage vircator, Phys. Lett. A. 378 (2014) 2423–2428.
- [92] Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Руннова, А.Е. Храмов, Обобщенная синхронизация связанных генераторов на виртуальном катоде, Изв. РАН. Сер. физическая 78 (12) (2014) 1608–1611.
- [93] Н.С. Фролов, С.А. Куркин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Ю.А. Калинин, Изучение механизмов генерации в системах с виртуальным катодом в рамках трехмерного электромагнитного моделирования электронного потока, Изв. РАН. Сер. физическая 78 (12) (2014) 1604–1607.
- [94] А.А. Короновский, Н.С. Фролов, А.Е. Храмов, Исследование хаотической генерации в цепочке связанных низковольтных виркаторов, in: Материалы IX Международной школы «Хаотические автоколебания и образование структур» ХАОС-2010, 2010, С. 126–127.
- [95] А.А. Короновский, Н.С. Фролов, А.Е. Храмов, Исследование характеристик генерации в цепочке однонаправлено связанных низковольтных виркаторов, Сборник трудов XIII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», 2011, С. 36.

- [96] Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Мощность выходного СВЧ излучения цепочки двух однонаправлено связанных низковольтных виркаторов, in: Материалы Международной Крымской конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2011, С. 846.
- [97] Н.С. Фролов, Влияние предварительной скоростной модуляции электронного потока на выходную мощность СВЧ генерации виркатора., Материалы XV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, 2012, С. 25.
- [98] Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Теоретический и экспериментальный анализ динамики генератора на виртуальном катоде под внешним гармоническим воздействием, Сборник трудов XIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», 2012, С. 34.
- [99] Н.С. Фролов, Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, А.В. Стародубов, А.Е. Храмов, Увеличение мощности генерации виркатора путём воздействия на него внешнего слабого гармонического сигнала., Материалы 22-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2012, С. 763.
- [100] О.И. Москаленко, Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Обобщенная синхронизация в системе двух однонаправлено связанных низковольтных виркаторов, Материалы 22-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2012, С. 769.
- [101] Н.С. Фролов, В.А. Максименко, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Метода расчета спектра показателей Ляпунова для пучково-плазменных систем, описываемых методом крупных частиц, Сборник трудов XIV Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», 2013, С. 46.
- [102] Н.С. Фролов, А.А. Короновский, В.А. Максименко, К. Ильенко, А.Н. Опанасенко, Т.Ю. Яценко, А.Е. Храмов, Расчет спектра пространственных показателей Ляпунова для пучково-плазменных систем, описываемых в рамках метода крупных частиц, in: Материалы 23-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2013, С. 769.
- [103] Н.С. Фролов, А.А. Короновский, В.А. Максименко, А.Е. Храмов, Анализ сложной динамики распределенных систем электроники СВЧ, моделируемых в рамках  $\text{pic}$

метода, Материалы X Международной школы «Хаотические автоколебания и образование структур», 2013, С. 126.

- [104] О.И. Москаленко, А.С. Павлов, Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Скрытая передача информации на основе обобщенной синхронизации хаотического сигнала на периодические генераторы, Материалы 24-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2014, С. 217.
- [105] Н.С. Фролов, С.А. Куркин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Ю.А. Калинин, Анализ сложной турбулентной динамики электронного потока в низковольтном виркаторе в рамках трехмерного электромагнитного моделирования, Материалы 24-й Международной конференции «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии», 2014, С. 835.
- [106] О.И. Москаленко, Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Способ скрытой передачи информации, Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Москва: ФИПС. 10.03.2014. Бюллетень N 7. (2014).
- [107] Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Программа моделирования частичной обобщенной синхронизации пространственно-временного хаоса в пространственно-распределенной системе, Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 04.06.2010. (2010).
- [108] А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Н.С. Фролов, Программа для моделирования нестационарных процессов, протекающих в цепочках и сетях генераторов на виртуальном катоде, Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 09.01.2013. (2013).
- [109] Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Программа для ЭВМ для диагностики хаотической синхронизации, Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 01.03.2013. (2013).
- [110] А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Н.С. Фролов, Программа для расчета спектра показателей Ляпунова для пространственно-распределенных пучково-плазменных систем, моделируемых в рамках PIC-метода, Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 05.08.2014 (2014).

- [111] Н.С. Фролов, А.Е. Храмов, А.А. Короновский, Расчет спектра показаний Ляпунова для связанных пространственно-распределенных пучково-плазменных систем, моделируемых в рамках метода крупных частиц, Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ. Москва. 23.01.2015 (2015).
- [112] С.А. Куркин, Численное моделирование нестационарных нелинейных процессов в электронно-волновых системах со сверхкритическими токами, Труды 51-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть 8. Проблемы современной физики, 2008, С. 45.
- [113] С.А. Куркин, Создание программного обеспечения для моделирования процессов в электронных пучках заряженных частиц со сверхкритическими токами, Сборник трудов конференции молодых ученых. Выпуск 7. Тезисы докладов II сессии научной школы-практикума «Технологии высокопроизводительных вычислений и компьютерного моделирования», 2009, С. 18.
- [114] А.А. Короновский, С.А. Куркин, И.И. Магда, О.Г. Мележик, А.Е. Храмов, 3d электромагнитное моделирование низковольтного генератора на виртуальном катоде с обратной связью, Материалы 20 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 2010, С. 899.
- [115] А.Е. Храмов, С.А. Куркин, Е.Н. Егоров, А.А. Короновский, Р.А. Филатов, Программный пакет для исследования и оптимизации нелинейных нестационарных процессов в микроволновых генераторах с электронной обратной связью, Математическое моделирование 23 (1) (2011) 3–18.
- [116] С.А. Куркин, А.А. Короновский, Е.Н. Егоров, Ю.И. Левин, Р.А. Филатов, А.Е. Храмов, Математическая модель и ее численная реализация для исследования и оптимизации генераторов с электронной обратной связью, Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика 18 (6) (2010) 106–137.
- [117] Ю.А. Калинин, А.Е. Храмов, Экспериментальное и теоретическое исследование влияния распределения электронов по скоростям на хаотические колебания в электронном потоке в режиме образования виртуального катода, ЖТФ 76 (5) (2006) 25–34.
- [118] Е.Н. Егоров, Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов, М.Ю. Морозов, Исследование мощности СВЧ генерации в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем поле, Письма в ЖТФ 32 (9) (2006) 71–78.

- [119] Е.Н. Егоров, Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, Ю.И. Левин, А.Е. Храмов, Исследование образования структур и хаотической динамики в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем поле, Радиотехника и электроника 51 (11) (2006) 51–63.
- [120] Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов, Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков Т. 2., М.: Физматлит, 2004.
- [121] С. К. Birdsall, А. В. Langdon, Plasma physics via computer simulation, Taylor and Francis Group, 2005.
- [122] А.С. Рошаль, Моделирование заряженных пучков, М.: Атомиздат, 1979.
- [123] I. J. Morey, С. К. Birdsall, Travelling-wave-tube simulation: the IBC code, IEEE Trans. Plasma Sci. 18 (3) (1990) 482.
- [124] А. Е. Храмов, А. А. Короновский, An approach to chaotic synchronization, Chaos 14 (3) (2004) 603–610.
- [125] А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Wavelet transform analysis of the chaotic synchronization of dynamical systems, JETP Lett. 79 (7) (2004) 316–319.
- [126] А. Е. Храмов, А. А. Короновский, Time scale synchronization of chaotic oscillators, Physica D 206 (3–4) (2005) 252–264.
- [127] А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Обобщенная синхронизация хаотических осцилляторов как частный случай синхронизации временных масштабов, Письма в ЖТФ 30 (23) (2004) 54–61.
- [128] А.А. Короновский, М.К. Куровская, А.Е. Храмов, О соотношении фазовой синхронизации хаотических осцилляторов и синхронизации временных масштабов, Письма в ЖТФ 31 (19) (2005) 76–82.
- [129] А.А. Короновский, А.Е. Храмов, Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения, М.: Физматлит, 2003.
- [130] N. F. Rulkov, M. M. Sushchik, L. S. Tsimring, H. D. Abarbanel, Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems, Phys. Rev. E 51 (2) (1995) 980–994.



- [131] L. Kocarev, U. Parlitz, Generalized synchronization, predictability, and equivalence of unidirectionally coupled dynamical systems, *Phys. Rev. Lett.* 76 (11) (1996) 1816–1819.
- [132] K. Pyragas, Weak and strong synchronization of chaos, *Phys. Rev. E* 54 (5) (1996) R4508–R4511.
- [133] H. D. Abarbanel, N. F. Rulkov, M. M. Sushchik, Generalized synchronization of chaos: The auxiliary system approach, *Phys. Rev. E* 53 (5) (1996) 4528–4535.
- [134] Р.А. Силин, В.П. Сазонов, *Замедляющие системы*, М.: Советское радио, 1966.
- [135] С.А. Кицанов, А.И. Климов, С.Д. Коровин, И.К. Куркан, И.В. Пегель, С.Д. Полевин, Виркатор с предмодуляцией электронного пучка на основе сильноточного импульсно-периодического ускорителя, *ЖТФ* 72 (5) (2002) 82–90.
- [136] A. S. Shlapakovski, T. Kweiler, Y. Hadas, Y. E. Krasik, S. D. Polevin, I. K. Kurkan, Effects of different cathode materials on submicrosecond double-gap vircator operation, *IEEE Transactions on Plasma Science* 37 (7) (2009) 1233–1241.
- [137] Y. E. Krasik, D. Yarmolich, J. Z. Gleizer, V. Vekselman, Y. Hadas, T. V. Gurovich, J. Felsteiner, Pulsed plasma electron sources, *Physics of Plasmas* 16 (5) (2009) 057103.
- [138] Y. E. Krasik, A. Dunaevsky, J. Felsteiner, Plasma sources for high-current electron beam generation, *Physics of Plasmas* 8 (5) (2001) 2466–2472.
- [139] T. Queller, A. S. Shlapakovski, Y. E. Krasik, Plasma formation in a double-gap vircator, *Journal of Applied Physics* 108 (2010) 103302.
- [140] M. V. Fazio, J. Kinross-Wright, B. Haynes, R. F. Hoeberling, The virtual cathode microwave amplifier experiment, *Journal of Applied Physics* 66 (6) (1989) 2675–2677.
- [141] E. B. Abubakirov, A. P. Konyushkov, Peculiarities of backward-wave amplification by relativistic high-current electron beams, *Plasma Science, IEEE Transactions on* 38 (6) (2010) 1285–1291.