

На правах рукописи

**ГАЛЛЯМОВА ОЛЬГА ВАЛЕРЬЕВНА**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ  
ПОТОКОВ С ПОЛЯМИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СТРУКТУР  
ГЕНЕРАТОРОВ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

специальность 01.04.04 – физическая электроника

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре общей физики физического факультета  
Московского Государственного Университета им. М. В. Ломоносова

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Слепков Александр Иванович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор Боголюбов Александр Николаевич,  
кафедра математики  
физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова;

доктор технических наук,  
профессор Елизаров Андрей Альбертович,  
кафедра лазерных и микроволновых  
информационных систем МИЭМ

**Ведущая организация:**

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

Защита состоится 12 мая 2011 года в 15-30 на заседании  
диссертационного совета Д 501.001.66 при Московском государственном  
университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские  
горы, д. 1, стр. 2, Физический факультет МГУ, ауд. СФА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического  
факультета МГУ им. М.В.Ломоносова

Автореферат разослан «\_\_\_» апреля 2011 года

Ученый секретарь Диссертационного совета Д 501. 001.66

К. ф.-м. н

Карташов Игорь Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Во множестве различных областей науки и техники возникает необходимость использовать мощные источники когерентного электромагнитного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. В качестве примеров можно назвать задачи СВЧ-энергетики, системы дальней связи, исследования свойств материалов, нетепловое воздействие на биологические объекты, а также на естественные и искусственные среды различной природы. Один из перспективных подходов к получению мощного микроволнового излучения состоит в использовании энергетических возможностей трубчатого релятивистского электронного потока (РЭП), формируемого взрывоэмиссионными катодами. С помощью сильноточных электронных ускорителей могут создаваться электронные пучки с импульсной мощностью более 100 ТВт [1]. При генерации мощного микроволнового излучения возникают специфические ограничения, связанные с повышением напряженности электрического поля вблизи металлической поверхности электродинамической структуры и увеличением вероятности высокочастотных пробоев, а также с проблемой сгущения спектра собственных мод. Эти трудности могут быть устранены благодаря использованию многоволновых механизмов взаимодействия электронного потока и переходу к сверхразмерным периодическим волноводам, поперечные размеры которых на порядок и более могут превосходить длину волны генерируемого излучения.

Как показывают проведенные экспериментальные исследования [1], наиболее удачными оказались генераторы, основанные на черенковском или дифракционном излучении электронных потоков, пролетающих вблизи периодической поверхности цилиндрического сверхразмерного волновода. В частности, в релятивистском дифракционном генераторе (РДГ) в сантиметровом диапазоне длин волн получена мощность излучения до 4.5ГВт [2]. Важное отличие дифракционного генератора от черенковского состояло в том, что длительность импульса излучения  $\tau_{ген}$  практически совпадала с длительностью импульса тока  $\tau_{имп}$ , в то время как в черенковском наблюдался срыв генерации и  $\tau_{ген} \sim 0.1 \tau_{имп}$  [1]. В релятивистских генераторах дифракционного излучения (РГДИ) для увеличения длительности импульса используется взаимодействие пучка с объемными волнами во всем объеме пространства взаимодействия замедляющей системы (ЗС).

Основное преимущество генераторов, действующих на объемных волнах, по сравнению с черенковскими приборами на поверхностных волнах, состоит в

более равномерном распределении поля в рабочем объеме электродинамических структур. Такая особенность распределения полей способствует реализации более равномерного вывода энергии из объема структуры и служит дополнительным фактором уменьшения вероятности СВЧ-пробоев. Однако, хотя первые эксперименты со столь мощными источниками микроволнового излучения в длинноимпульсном режиме были проведены еще в конце 80-х годов, надлежащая теория, описывающая физические процессы в осесимметричных структурах РГДИ без излишних упрощений, до сих пор не разработана. Недостаточность строгой теории особенно заметна для вариантов двухсекционных РГДИ и генераторов на открытых линиях передачи.

При анализе многоволновых процессов в приборах на сверхразмерных структурах с длительным взаимодействием в настоящее время разработан ряд методов численного моделирования. Наиболее распространенными являются сеточные методы, в рамках которых строятся дискретные аналоги двух- и трехмерных краевых задач с помощью метода конечных разностей (МКР) и его варианта для вариационной постановки задачи - метода конечных элементов (МКЭ) [3]. Очевидным достоинством этих методов является универсальность: их удобно использовать для систем произвольной формы, в том числе с особенностями решения. Но к недостаткам этих методов (как оборотная сторона такой многофункциональности) следует отнести повышенные требования к ресурсам вычислительной техники.

Исторически первым методом моделирования приборов с длительным продольным взаимодействием электронного потока с полями периодической замедляющей системы были методы связанных волн [4] и метод эквивалентных схем. В методе эквивалентных схем представление одномодовых систем, в частности действующих у  $\pi$ -вида колебаний, опиралось на предположение фиксированности структуры полей в каждой ячейке электродинамической системы. Вся электродинамическая замедляющая структура представлялась цепочками связанных многополюсников, включающих в себя эквивалентные схемы с сосредоточенными параметрами. И, хотя метод мог описывать взаимодействие потока только с поверхностной волной системы, результаты его в методическом отношении были важны для понимания механизмов процессов в замедляющих структурах приборов СВЧ в одномодовом приближении.

Для систем с аксиальной симметрией удобным является подход, основанный на использовании различных вариантов метода поперечных сечений. Такой подход, основанный на методе Галеркина, использует разложение полей в системе по известному базису функций, например, модам

гладких волноводов сравнения или функциям поперечных сечений. Указанные методы имеют важные преимущества, в частности, по сравнению с сеточными методами, где сеточная диффузия и сеточная дисперсия могут накладывать нефизические эффекты на общую картину результатов численного эксперимента. Привлекательность использования этих методов заключается в относительной простоте постановки задачи на собственные волны структуры, как без потока, так и с потоком, описываемым в линейном приближении в виде волн. Возможность с единых позиций рассматривать различные механизмы взаимодействия потока и поля собственных волн системы облегчает возможности анализа физических процессов в структуре.

Вместе с тем учет непрерывности спектра волн в системах конечной длины требует решения отдельной сложной задачи построения матрицы трансформации волн на входе и выходе устройства, и зачастую в таких методах вводится дополнительное предположение, что система на входе и выходе соединена с гладкими полубесконечными волноводами. С другой стороны, в замедляющих структурах на открытых линиях передачи с увеличенными распределенными потерями, которые были использованы в качестве выходной секции двухсекционных РДГ [5] с целью селекции мод, в системах отсутствуют собственные волны. Для моделирования таких структур в принципе не могут быть применены методы, основанные на разложении полей в системе по известному базису функций – в частности, методы типа метода Галеркина. Таким образом, для открытых структур очевидна необходимость развития строгого метода рассмотрения задачи без введения дополнительных априорных упрощений в физической модели дифракции возбуждающего поля на конечных осесимметричных структурах с различной формой профиля поверхности замедляющей структуры. Таким методом является метод интегральных уравнений.

Вид точного решения задачи дифракции поля потока на периодических неоднородностях осесимметричной замедляющей структуры РДГ существенно зависит от особенностей геометрии ее поверхности. С математической точки зрения это краевая задача для уравнения эллиптического типа в областях с границей, представляющей собой односвязный или многосвязный контур сложной периодической формы. Такая задача не имеет аналитического решения, поэтому возникает необходимость перехода к численному анализу.

**Цель** работы – теоретическое исследование механизмов взаимодействия сильноточных электронных потоков с полями осесимметричных периодических

структур релятивистских дифракционных генераторов в области частот  $2\pi$ -вида колебаний. Для достижения этой цели были поставлены следующие основные задачи работы:

- разработать и создать теоретические модели, численные алгоритмы и программы для описания взаимодействия промодулированного трубчатого электронного потока с полями сверхразмерных осесимметричных периодических структур конечной длины, профиль поверхности которых задается **односвязным** или **многосвязным** контуром;
- исследовать особенности дифракционного излучения промодулированного трубчатого электронного потока в открытых и закрытых осесимметричных периодических структурах конечной длины;
- изучить и проанализировать механизмы самосогласованного взаимодействия электронного потока и поля в релятивистских дифракционных генераторах и их влияние на развитие нестационарных процессов в одно- и двухсекционных системах.

В ходе выполнения работы для решения задач дифракции возбуждающего поля на конечных осесимметричных структурах использовались два основных подхода.

1. Метод интегральных уравнений (ИУ), заключающийся в сведении уравнений электродинамики к поверхностным интегральным уравнениям с функцией источника в ядре, зависящем от расстояния между точками интегрирования и наблюдения на поверхности замедляющей структуры. Метод позволяет рассматривать дифракцию поля промодулированного электронного потока на односвязных и многосвязных структурах, связывая значения приповерхностных полей периодической системы с ее значениями во всем объеме пространства взаимодействия.

2. Матричный многомодовый метод (МММ) - вариант метода поперечных сечений, основанный на разбиении произвольного нерегулярного волновода на отрезки гладких волноводов сравнения и разложении полей на этих участках по полным для решения уравнений Максвелла системам функций – модам гладкого волновода. Метод позволяет исследовать нестационарные процессы самосогласованного взаимодействия потока и поля в изучаемых структурах, определять эффективность, модовый состав и спектр излучения.

Достоверность и обоснованность применяемых моделей в закрытых системах (с профилем в виде односвязного контура) доказывается сопоставлением результатов, полученных с помощью обоих использованных

теоретических подходов, с известными данными, полученных другими электродинамическими методами. В частности, распределения полей в гладком цилиндрическом волноводе (при нулевой гофрировке) для выбранной в работе поляризации сравнивались с известными аналитическими зависимостями, дисперсионные характеристики – с полученными методом Уолкиншоу [6]. В случае открытых систем на последовательности торов (с многосвязной формой контура) **адекватность** первой из развиваемых моделей в ее асимптотическом приближении для одного тора большого радиуса доказывает сравнение и хорошее совпадение с данными, полученными аналитически в классической модели рассеяния на цилиндре [7].

**Научная новизна** работы определяется достижением следующих приоритетных результатов.

- Разработан метод математического моделирования дифракционного излучения трубчатого релятивистского электронного потока в сверхразмерных осесимметричных периодических волноводах в области частот  $\pi$ - и  $2\pi$ -вида колебаний основной аксиально-симметричной моды.
- Построены и программно реализованы вычислительные алгоритмы, которые при моделировании реальных осесимметричных сверхразмерных структур достаточно большой, но конечной длины ( $20 \div 40$  периодов) используют периодичность системы, сокращая этим время численного эксперимента.
- Впервые в широком диапазоне частот изучены резонансные свойства открытых осесимметричных периодических систем на последовательности торов, возбуждаемых промодулированным трубчатым электронным потоком, и обоснованы перспективы использования открытых периодических систем в релятивистских дифракционных генераторах.
- В приближении медленно меняющихся амплитуд впервые были проанализированы процессы возникновения и установления генерации в одно- и двухсекционных структурах релятивистского дифракционного генератора.
- Сопоставление характера особенностей полей, устанавливающихся в секциях сверхразмерных периодических волноводов, на частотах вблизи  $2\pi$ -вида колебаний основной аксиально-симметричной моды периодической структуры и на критической частоте ближайшей к  $2\pi$ -виду собственной объемной моды эквивалентного гладкого волновода позволило теоретически доказать, что режим совмещения двух указанных механизмов существенно повышает значение КПД и устойчивость генерации в РДГ.

**Практическая значимость** результатов проведенного в представленной работе исследования определяется необходимостью теоретического и численного анализа для определения границ рабочих областей устойчивой генерации, нахождения геометрических параметров наиболее эффективных устройств, чтобы снизить до минимума риск безрезультатных поисков рабочих режимов РДГ при проведении дорогостоящих и требующих длительной подготовки реальных физических экспериментов. В работе получены следующие **результаты**.

- Развита теоретический метод и создан комплекс программ, позволяющих исследовать резонансные режимы дифракционного излучения трубчатого релятивистского электронного потока в сверхразмерных осесимметричных периодических структурах конечной длины, описываемых **односвязным** или **многосвязным** профилем поверхности, в области частот  $\pi$ - и  $2\pi$ -вида колебаний основной аксиально-симметричной моды.
- Результаты численного исследования позволили объяснить ряд характеристик существующих экспериментальных макетов РГДИ и могут быть использованы для создания устройств с улучшенными характеристиками.
- На основе анализа результатов численного моделирования были выработаны практические рекомендации по выбору параметров сильнооточного пучка и геометрии замедляющей структуры, которые могут обеспечить эффективные режимы устойчивой генерации релятивистских генераторов дифракционного излучения.

### **Выносимые на защиту положения**

1. В открытых структурах на последовательности торов выявлены различные режимы отклика системы на возбуждение электронным потоком в зависимости от нормированной частоты (возбуждение индивидуальных колебаний торов; возникновение продольных колебательных мод вблизи  $\pi$ -вида и резонансов гибридных волн вблизи  $2\pi$ -вида), длины и диаметра структуры (фильтрация мод вблизи границ полос прозрачности).
2. В одно- и двухсекционных структурах как открытого, так и закрытого типа, частота ближайшего к  $\pi$ -виду резонанса существенно зависит от длины системы, поскольку механизм возникновения резонансов определяется установлением в системе резонансов поверхностной волны, которые создают переотражения от краев структуры. В **двухсекционных системах РДГ** частота ближайшего к  $2\pi$ -виду резонанса практически **не зависит от длины секций**,



так как наряду с поверхностной волной, обеспечивающей синхронизм с потоком, вблизи границ высших полос прозрачности основным механизмом формирования резонансов является образование объемных волн.

3. Показано повышение эффективности и устойчивости генерации при переходе от односекционных к двухсекционным структурам РДГ и теоретически доказано, что режим совмещения резонансов на частотах вблизи  $2\pi$ -вида колебаний основной аксиально-симметричной моды периодической структуры и на критической частоте ближайшей к  $2\pi$ -виду собственной объемной моды эквивалентного гладкого волновода существенно повышает значение КПД и устойчивость генерации в **двухсекционных системах** РДГ и приводит к расширению рабочего диапазона тока пучка, при котором генерация остается одночастотной.

**Апробация работы** Основные результаты диссертационной работы были представлены автором лично на следующих российских и международных школах-семинарах и конференциях: V, VII, XI, XII Всероссийских школах-семинарах «Волновые явления в неоднородных средах». (Красновидово, 1996, 2000; Звенигород, 2008, 2010), VI, VIII, XII Всероссийских школах-семинарах «Физика и применение микроволн» (Красновидово, 1997; Звенигород 2001, 2009), IX, X межвузовских научных школах молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (Москва, 2008, 2009); 41<sup>st</sup>, 42<sup>nd</sup> Days on Diffraction (Saint Petersburg, 2009, 2010), а также на семинарах кафедры физической электроники и кафедры общей физики физического факультета МГУ.

**Публикации** Всего по теме диссертации автором опубликовано в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук (согласно списку ВАК), 5 статей. Кроме того, результаты работы автора были опубликованы также в 12 тезисах и 1 статье в сборниках трудов российских и международных конференций (см. список в заключении).

**Личный вклад автора** Все включенные в диссертацию результаты были получены лично автором или при его непосредственном участии. Интерпретация результатов производилась совместно с соавторами публикаций.

**Структура и объем диссертации** Диссертация состоит из введения, аналитического обзора литературы (Глава 1), главы с изложением

математической постановки задачи и развиваемых методов исследования (Глава 2), трех основных глав по данным численного эксперимента с изложением выносимых на защиту оригинальных результатов (Главы 3-5), заключения (содержащего общие результаты и выводы) и списка библиографии (142 наименования). Работа изложена на 175 страницах, содержит 62 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

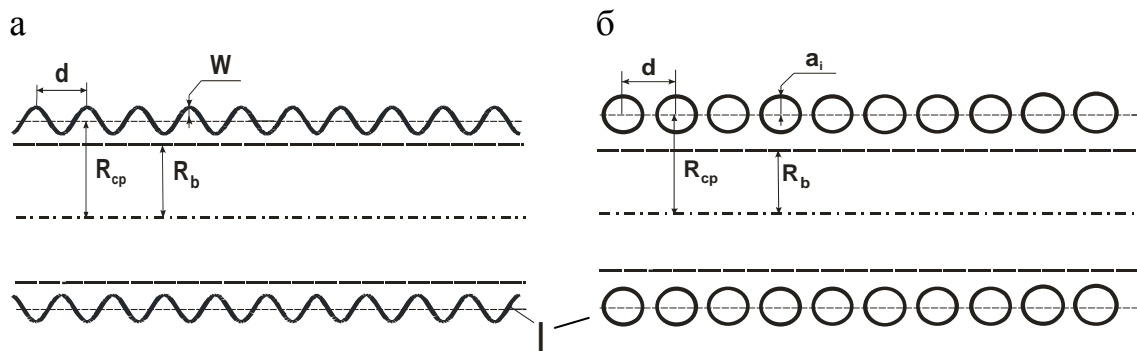
Во **введении** содержится описание состояния области исследования многоволновых приборов с длительным продольным взаимодействием трубчатого РЭП с полями осесимметричных сверхразмерных замедляющих структур. Формулируются основные цели и задачи исследования, обосновываются актуальность темы и достоверность применяемых моделей, перечисляются наиболее важные результаты диссертационной работы с указанием их новизны и практической значимости, кратко излагается содержание работы.

**Первая глава** составлена в форме аналитического обзора литературы, посвященной экспериментальному и теоретическому исследованию черенковских и дифракционных устройств релятивистской сильноточной СВЧ-электроники. В главе рассматриваются общие физические принципы работы таких приборов, кратко перечисляются технические характеристики их экспериментально реализованных моделей и развитые ранее подходы к их теоретическому описанию. В частности, в **п. 1.1** прослеживаются тенденции развития традиционной и релятивистской сильноточной СВЧ-электроники, **п. 1.2** посвящен рассмотрению явления дифракционного излучения и методов его теоретического описания.

В **п. 1.3** рассматриваются известные ранее методы теоретического анализа устройств такого типа, проводится их сравнение и анализ границ применимости. Наибольшее внимание уделяется точным электродинамическим методам, в частности основанным на прямом решении уравнений Максвелла с заданными граничными и начальными условиями. Выявляются отличия развиваемого нами подхода и особенности постановки задачи настоящего исследования.

**Вторая глава** посвящена математической постановке дифракционной задачи для конкретного вида геометрии устройств черенковского и дифракционного генератора, а также изложению двух применяемых в работе методов ее теоретического исследования. **П. 2.1** содержит постановку дифракционной задачи и основные определения рассматриваемых явлений. В

разделе **2.1.1** определяются вид и параметры моделируемых развиваемым методом замедляющих структур (приведенные на рис. 1). В разделе **2.1.2** даются определения дифракционного излучения в бесконечно протяженных структурах, рассматриваются особенности моделирования дифракционного излучения в структурах конечной длины.



**Рисунок 1 - Осевое сечение замедляющих периодических поверхностей а) с замкнутым односвязным профилем, б) с многосвязным профилем.**

**П. 2.2** содержит изложение основных этапов вывода развиваемого в диссертации одного из вариантов метода интегральных уравнений. В цилиндрической системе координат, продольная ось которой совпадает с осью симметрии периодической структуры (рис. 1), рассматривается решение краевой задачи для аксиально-симметричных волн определенной поляризации (ТМ). В качестве модели источника возбуждения рассматривается поле распространяющегося вблизи стенки промодулированного на заданной частоте тонкого трубчатого электронного потока радиусом  $R_b$ . В разделе **2.2.1** для осесимметричной задачи производится вывод интегральных уравнений (интегральных представлений), связывающих значения поля на идеально проводящей периодической поверхности системы с ее значениями во всем объеме пространства взаимодействия в приближении заданного собственного поля возбуждающего потока.

В области  $S$ , где распределены источники падающего поля, полное, падающее и отраженное поля должны удовлетворять системе уравнений Максвелла, на ее границе  $L$  – граничным условиям для идеально проводящей поверхности, и условиям излучения на бесконечности. Вместо введения в правую часть уравнения Максвелла фиктивных токов электронного потока для полного поля рассматривается падающее поле, которое возбуждается потоком вблизи поверхности.

Вид поляризации возбуждающего поля волной электрического типа  $E_{0m}$  позволяет свести задачу от векторной для однородных уравнений Максвелла к

скалярной для уравнения типа Гельмгольца относительно азимутальной компоненты магнитного поля

$$\frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial z^2} + \left( k^2 - \frac{1}{\rho^2} \right) H_\varphi = 0. \quad (1)$$

Далее с использованием аппарата сопряженных дифференциальных операторов [8] и при переходе к неоднородному уравнению с учетом распределения источников возбуждающего поля было получено уравнение, позволяющее выразить величину полного поля в объеме через его значения на поверхности, которое является интегральным уравнением Фредгольма II рода с ядром в виде функции источника для свободного пространства, зависящим только от расстояния между точками наблюдения (М) и интегрирования (Р):

$$H(M) = \frac{1}{2\pi} \int_L (G(M,P) \frac{\partial H(P)}{\partial n_P} - H(P) (\frac{\partial G(M,P)}{\partial n_P} - \frac{1}{\rho} G(M,P) \cos(\hat{n}, \rho))) dl_P - \frac{1}{2\pi} \int_S G(M,P) f(P) dq_P. \quad (2)$$

Здесь  $G(M,P)$  – фундаментальное решение уравнения (1) для свободного пространства, представимое в виде интеграла по азимутальной координате  $\varphi$ :

$$G(M,P) = \rho_M \int_0^{2\pi} \frac{e^{ikR}}{R} \cos \varphi d\varphi, \quad R = \sqrt{\rho_M^2 + \rho_P^2 - 2\rho_M \rho_P \cos \varphi + (z_M - z_P)^2}, \quad (3)$$

где  $R$  – расстояние между точками М и Р.

В частности, ядро  $K(M,P) = -\frac{\partial G}{\partial n_P}$  интегрального уравнения Фредгольма II рода для синусоидального гофрированного волновода имеет вид:

$$K(M,P) = \rho_M \int_0^{2\pi} \frac{e^{ikR}}{R} \left( \left( \frac{ik}{R} - \frac{1}{R^2} \right) \left( \frac{(\rho_P - \rho_M \cos \varphi) + R'(z_P)(z_P - z_M)}{\sqrt{1 + R'^2(z_P)}} \right) \right) \cos \varphi d\varphi, \quad (4)$$

где  $R'$  – производная от функции, параметрически задающей форму огибающей поверхности гофрированного волновода:  $R(z) = R_0 + W \cos(2\pi z/d)$ ,  $R_0$  – средний радиус волновода,  $d$  – период,  $W$  – амплитуда гофрировки.

Для системы торов ядро ИУ принимает вид:

$$K(M,P) = \rho_M \int_0^{2\pi} \frac{e^{ikR}}{R} \left( \left( \frac{ik}{R} - \frac{1}{R^2} \right) ((\rho_P - \rho_M \cos \varphi) \sin \alpha + (z_P - z_M) \cos \alpha) \right) \cos \varphi d\varphi. \quad (5)$$

Функция  $f(P)$  в правой части уравнения (2) задает вид распределения возбуждающих источников падающего поля. В явном виде представление возбуждающего поля трубчатого электронного потока приведено далее в

разделе **2.2.2**. Затем интегральное уравнение (2) при численном решении сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Для практики интерес представляет изучение электродинамических систем с достаточно большим числом периодов:  $12 \div 20$  в гофрированных структурах с односвязным контуром поверхности, а в открытых структурах с многосвязным контуром, как было показано в представляемой работе,  $30 \div 40$  периодов. Проблема обеспечения необходимой точности решения приводит к рассмотрению матрицы такой СЛАУ очень большой размерности. Учет периодичности системы и вида возбуждения позволил использовать приведенные в разделе **2.2.3** быстрые алгоритмы численного решения для блочно-тёплицевой матрицы.

Как первый шаг дифракционной задачи при решении системы уравнений, к которым сведено ИУ Фредгольма, получаем наведенные на поверхности структуры токи, а затем по их распределению пересчитываем поля в объеме структуры. Подробные формулы для пересчета полей в объеме приведены в разделе **2.2.4**.

В п. **2.3**. кратко описаны особенности численной реализации пакета программ, который был создан на основе разработанного варианта метода интегральных уравнений. В разделе **2.3.1** результаты для области частот  $\pi$ - и  $2\pi$ -вида предваряются кратким описанием программной реализации и различных режимов работы программы на основе разработанного метода интегральных уравнений. Излагается используемая в дальнейшем процедура поиска резонансных режимов отклика системы на возбуждение электронным потоком - метод электронного зонда. В разделе **2.3.2** на основе анализа сходимости решения в методе интегральных уравнений изложена процедура выбора оптимального числа разбиений элемента периодичности и выбора параметров интегрирования для получения результатов, приводимых в третьей и четвертой главе. В разделе **2.3.3** описано тестирование результатов работы программы на основе метода интегральных уравнений при сопоставлении с аналитическими данными для предельных случаев. Сравнивались распределения полей гладкого волновода (при нулевой гофрировке) и вид распределения токов на поверхности одного кольца с увеличенным радиусом  $R_{cp}=100$  см ( $D/\lambda > 60$ ). В разделе **2.3.4** в качестве примеров одного из режимов работы приведены графики амплитуд наведенных токов в открытой системе из 20 торов от коэффициента замедления  $\beta$ , иллюстрирующие резонансы продольных колебательных мод при различных величинах отстройки от частоты  $\pi$ -вида колебаний. Дается интерпретация приведенных резонансных зависимостей на языке дисперсионных

характеристик. Отдельный пункт посвящен постановке задачи для рассмотрению особенностей численного моделирования самосогласованного взаимодействия потока и поля (п. 2.4).

При построении нестационарной математической модели самосогласованного взаимодействия потока и поля использовался теоретический метод, разработанный в [9]. Краткое его описание приводится в п. 2.5. Метод является одним из вариантов метода поперечных сечений.

В его основе лежит представление произвольного нерегулярного цилиндрического волновода в виде последовательности участков гладких волноводов и построение матрицы трансформации полей от входного к выходному концу структуры. В пределах каждого участка фиксированного радиуса, обозначенного номером  $s$ , вихревое электрическое и магнитное поля разлагались по полной для решения уравнений Максвелла системе функций - прямым и обратным волнам гладкого волновода:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{e,s} &= \sum_{n=1}^N \left[ C_{n,s}^+(z,t) \mathbf{E}_{n,s}^+ + C_{n,s}^-(z,t) \mathbf{E}_{n,s}^- \right] \\ \mathbf{H}_s &= \sum_{n=1}^N \left[ C_{n,s}^+(z,t) \mathbf{H}_{n,s}^+ + C_{n,s}^-(z,t) \mathbf{H}_{n,s}^- \right] \end{aligned} \quad (6)$$

где  $C_{n,s}^{\pm}(z,t)$ , - комплексные коэффициенты разложения,  $\mathbf{E}_{n,s}^{\pm}, \mathbf{H}_{n,s}^{\pm}$  - векторы электрического и магнитного поля моды  $E_{0n}$ ,  $N$  - число рассматриваемых мод. Сшивание полей на скачке радиуса волновода производится с учетом непрерывности потока вектора Умова-Пойнтинга. После подстановки разложений (6) в уравнения Максвелла уравнения возбуждения электромагнитного поля электродинамической системы РДГ записываются в матричном виде относительно векторов  $\bar{x}^{\pm} = (C_1^{\pm}, C_2^{\pm}, \dots, C_N^{\pm})$  и приводятся к системе матричных уравнений, удобной для численного анализа с помощью метода прогонки. Процессы в электронном пучке описываются с помощью модели крупных частиц в форме бесконечно тонких колец с зарядом  $q = \frac{2\pi J}{\omega M_k}$  и массой  $m = m_0 \frac{q}{e}$ , где  $m_0, e$  - масса и заряд электрона,  $M_k$  - число частиц на длину волны.

Для каждой крупной частицы в пренебрежении силами пространственного заряда записывается релятивистское уравнение движения

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{q}{\omega} \operatorname{Re}(E_{gz} e^{i\tau}), \quad \text{где } p = m_0 \gamma v_0 \text{ - импульс крупной частицы, } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2}} -$$

релятивистский фактор,  $\tau = \omega t$  - нормированное время,  $E_{Bz}$  — продольная составляющая напряженности вихревого поля.

С помощью МММ в работе исследовались сверхразмерные одно- и двухсекционные структуры РДГ с синусоидальной гофрировкой и с неоднородностями «полуторы на пьедестале». На рис. 2 приведен один из вариантов исследованной двухсекционной структуры.

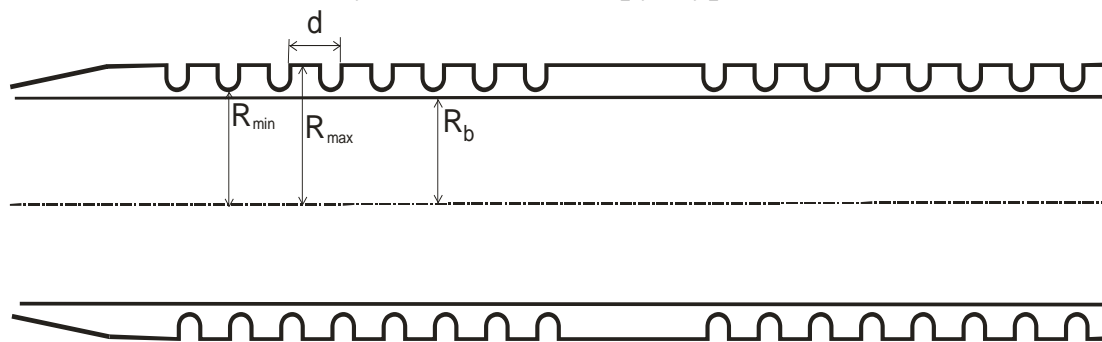


Рисунок 2 - Вид двухсекционной структуры РДГ для моделирования МММ.

Перед первой секцией могли добавляться различные конструктивные элементы, используемые в реальном эксперименте для оптимизации выходных параметров: отражательная диафрагма, резонансный рефлектор, отрезок запердельного волновода.

Метод позволяет рассматривать процессы установления колебаний в изучаемых системах в слабонестационарном приближении, предполагающем малое изменение амплитуды поля за период  $T = 2\pi/\omega$ , определять модовый состав, эффективность взаимодействия и спектр излучения.

Далее в п. 2.6 обосновывается адекватность развитого в работе подхода к решению задачи дифракции собственного поля на периодических ЗС. С этой целью приводится анализ сравнения резонансно-частотных характеристик гофрированного волновода, полученных с использованием двух рассмотренных во второй главе методов: матричного многомодового метода (МММ) и метода интегральных уравнений (ИУ).

Приведем итоги этой центральной главы, важной для понимания использованных в работе подходов к решению задачи дифракции на периодических неоднородностях.

1. Для описания дифракционного излучения промодулированного электронного потока в ограниченных периодических осесимметричных структурах краевая задача для уравнения типа Гельмгольца сведена к интегральным уравнениям. Для решения дифракционной задачи при рассмотрении процессов на заданной частоте в качестве источников падающего

поля используется поле предварительно промодулированного на данной частоте электронного потока.

2. При моделировании процессов в реальном трехмерном пространстве использование осевой симметрии системы обусловило переход к рассмотрению квазитрехмерной модели. Такое уменьшение размерности задачи позволило существенно снизить вычислительные затраты в численном эксперименте. Интегральные уравнения сведены к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с блочно-тёплицевой матрицей, что позволило использовать быстрые методы численного решения полученной системы уравнений.

3. Разработанный метод позволил в приближении заданного тока находить наведенные на поверхности периодической структуры токи и пересчитывать по их распределению поля в объеме сверхразмерных электродинамических систем.

4. Сравнение результатов развитого в настоящей работе метода ИУ с данными известного ранее МММ дает хорошее совпадение (в пределах 1% в интервале нормированных частот  $1 < 2d/\lambda < 2$ ) положения резонансов на резонансно-частотных характеристиках синусоидальной гофрированной структуры.

В **третьей главе** работы изложены результаты численного моделирования методом ИУ процессов в периодической системе одной секции дифракционного генератора с синусоидальным профилем поверхности. При численном моделировании параметры систем выбирались в соответствии с характеристиками экспериментально реализованных устройств микроволновой электроники.

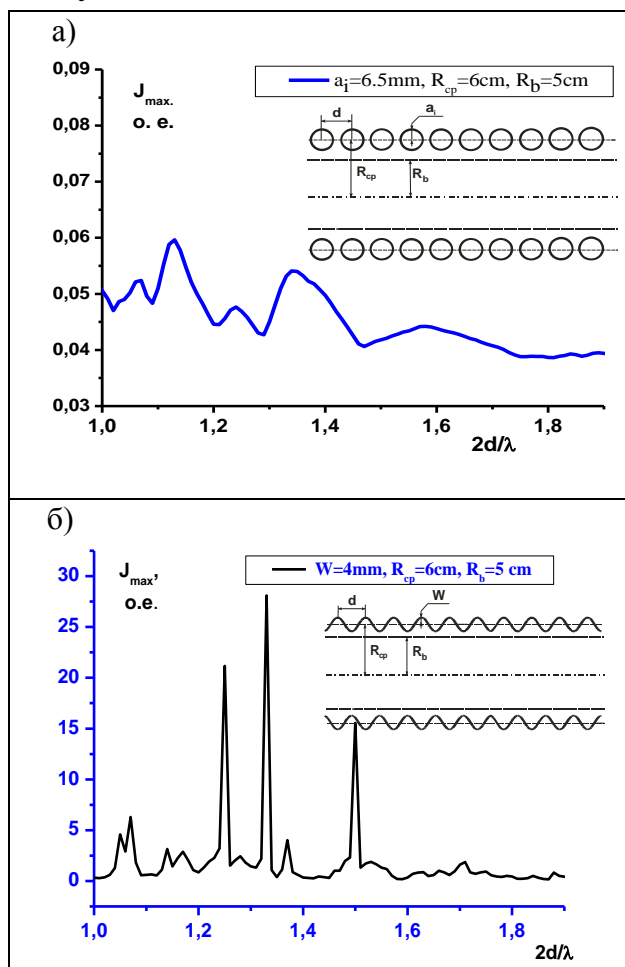
В **п. 3.1** рассмотрена дисперсия волн в сверхразмерном периодическом гофрированном волноводе на основе дисперсионных характеристик, полученных матричным многомодовым методом. Доказывается эквивалентность 2 подходов при изучении резонансных зависимостей возбуждения периодических замедляющих структур: 1. диаграммы зон Бриллюэна дифракционного излучения и 2. дисперсионной характеристики гофрированного волновода, которая получается как решение задачи на собственные волны такой периодической ЗС в методе поперечных сечений.

Продольные моды колебаний электромагнитных полей в секции периодического волновода с синусоидальной гофрировкой (область частот вблизи  $\pi$ -вида колебаний) рассматриваются в **п. 3.2**. При проведении качественного сравнения результатов матричного многомодового метода и метода интегральных уравнений в исследовании резонансных явлений в



периодических волноводах на частотах вблизи  $\pi$ -вида колебаний получено хорошее соответствие по положению резонансных максимумов на АЧХ и по виду распределений полей в объеме структуры. По результатам двух методов изучено соотношение между поверхностными и объемными полями гибридных мод в объеме пространства взаимодействия вблизи границ высших полос прозрачности (п. 3.3). Показано, что в высших полосах прозрачности при возбуждении объемных полей в системах конечной длины главную роль играют резонансы гибридных волн сверхразмерных периодических волноводов. Вблизи частот  $2\pi$ -вида колебаний гибридная мода имеет сложную структуру поля, причем продольная компонента  $E_z$  близка к соответствующей компоненте объемной моды эквивалентного гладкого волновода, а радиальная компонента  $E_r$  электрического поля соответствует суперпозиции объемной моды меньшего индекса и поверхностной волны.

В **четвертой главе** рассматривается излучение РЭП в периодических осесимметричных системах на последовательности торов (с увеличенными распределенными потерями). В п. 4.1 подробно рассматриваются механизмы возбуждения потоком полей одиночного тора.



**Рисунок 3 - Сравнение РЧХ волновода на последовательности торов (а) и синусоидально гофрированного волновода (б) с аналогичными параметрами (длина системы 20 периодов) в одном и том же частотном диапазоне  $1 < 2d/\lambda < 1.9$ .**

Определению длины формирования дифракционного излучения в открытой структуре на последовательности торов посвящен п. 4.2. Сравнение резонансно-частотных характеристик открытой системы на последовательности торов (рис. 3а) с аналогичными характеристиками гофрированного волновода (рис. 3б) в одном и том же частотном диапазоне  $1 < 2d/\lambda < 1.9$

доказывает свойство селективности открытых волноводов на последовательности торов (п. 4.3). Установление продольных мод колебаний электромагнитных полей при рассмотрении резонансных явлений вблизи границы низшей полосы прозрачности (в области частот  $\pi$ -вида колебаний) в секции открытой электродинамической структуры длиной  $20 \div 40$  торов изучается по резонансно-частотным характеристикам (раздел 4.3.1) и по пространственным распределениям объемных полей (раздел 4.3.2). Как и в синусоидально гофрированных системах, в открытой структуре конечной длины на последовательности торов в высших полосах прозрачности при возбуждении объемных полей в системах главную роль в формировании общей картины играют резонансы гибридных мод полей периодических волноводов (раздел 4.3.3). Провести аналогию со свойствами закрытых структур позволяет вид продольных распределений полей.

Как известно, гибридные моды возникают в периодическом волноводе при взаимодействии собственных мод эквивалентного гладкого волновода с различными радиальными индексами. Вблизи частоты  $2\pi$ -вида колебаний гибридная мода имеет сложную структуру поля, причем радиальная компонента  $E_r$  электрического поля соответствует суперпозиции **объемной моды** меньшего индекса и **поверхностной волны**, а продольная компонента  $E_z$  близка к соответствующей компоненте моды гладкого волновода. Отдельно в п. 4.4 рассмотрен переход к квазиплоской электродинамической системе, являющейся предельным случаем сверхбольшого поперечного размера системы. Исследовалась система со средним радиусом 30 см ( $D/\lambda \approx 20$ ). На РЧХ таких систем были обнаружены 3 области резонансного возрастания амплитуды наведенных токов. При малых нормированных частотах ( $2d/\lambda < 0,7$ ) в короткой системе (менее 15 периодов) наиболее существенный вклад в возникновение резонансов вносят индивидуальные колебания полей на каждом из торов по отдельности и установление распределений наведенных токов по периметру сечения тора. С приближением к области частот  $\pi$ -вида и удлинением системы проявляются волноведущие свойства структуры: в ней устанавливаются резонансы продольных колебательных мод. С возрастанием среднего радиуса (рис. 4) преобладающую роль над фоновыми пиками объемных мод начинают играть резонансные пики в области частот  $\pi$ - и  $2\pi$ -видов колебаний. По мере уменьшения зазора в открытой системе увеличенного диаметра значительно возрастает амплитуда колебаний в области частот  $\pi$ -вида колебаний, при дальнейшем уменьшении зазора и увеличении длины преобладает амплитуда колебаний в области  $2\pi$ -вида колебаний.

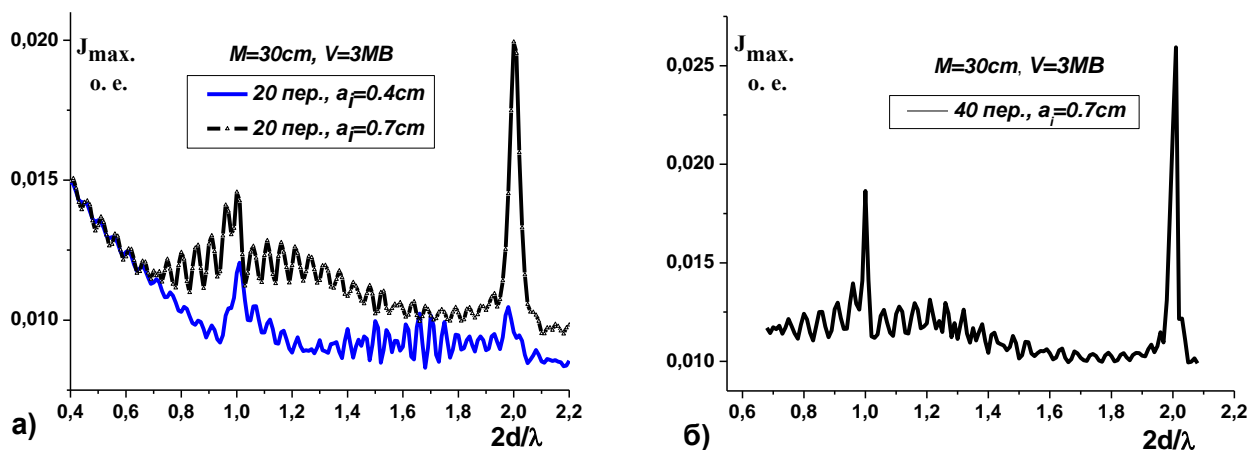


Рисунок 4 - Фильтрация мод на резонансно-частотных характеристиках открытой квазиплоской структуры со средним радиусом 30см.

Таким образом, в настоящей работе в квазиплоском случае найдены режимы фильтрации мод в открытой системе вблизи частот  $\pi$ - и  $2\pi$ -вида колебаний.

**Пятая глава** посвящена изучению условий установления устойчивой генерации в одно- и двухсекционной структуре РДГ на основе численного моделирования многоволновых процессов самосогласованного взаимодействия потока и поля в объеме двухсекционной замедляющей структуры. Исследования проводились с помощью разработанного ранее матричного многомодового метода. Глава предваряется теоретическим анализом взаимодействия потока и поля в двухсекционной системе (п. 5.1) В п. 5.2 исследованы резонансные режимы самосогласованного взаимодействия потока и поля в двухсекционных системах РДГ в области частот  $2\pi$ -вида колебаний, проведено их сравнение с параметрами односекционных структур. Разделяется роль объемных и продольных резонансов. В разделе 5.2.1. в результате исследований в закрытых односекционных структурах в области **частот  $2\pi$ -вида** колебаний обнаружена **фиксация частоты** резонансного возбуждения **прямой и обратной волн** при изменении продольного волнового числа или скорости потока, которая аналогична фиксации частоты резонанса вблизи границы нижней полосы прозрачности. Обнаруженное явление иллюстрирует рис. 5. Маркерами **▲** на графике обозначены полученные в численном эксперименте значения частоты резонансного отклика системы при различных значениях продольного волнового числа  $k_z d/\pi$ . Ближайшие к области частот  $2\pi$ -вида значения продольного волнового числа проявляют неизменное значение нормированной частоты  $2d/\lambda=1.94$  (точки 1,2,3 на рис. 5), при увеличении продольного волнового числа в синхронизме с потоком оказывается обратная волна, и с

переходом точки синхронизма к режиму обратной волны уменьшается значение нормированной частоты резонансного возбуждения системы (точки 4,5).

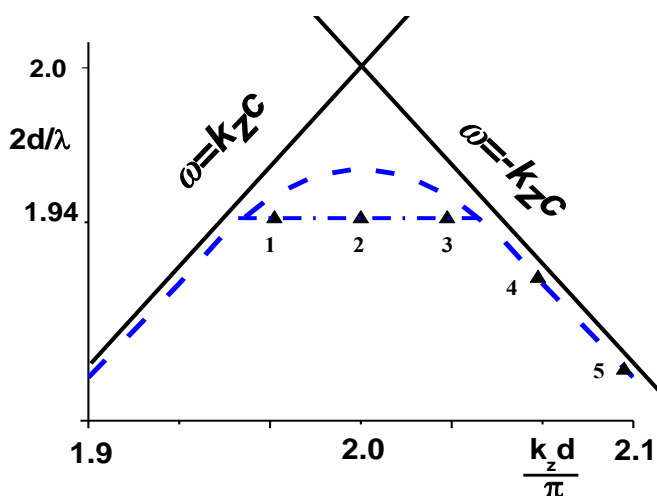


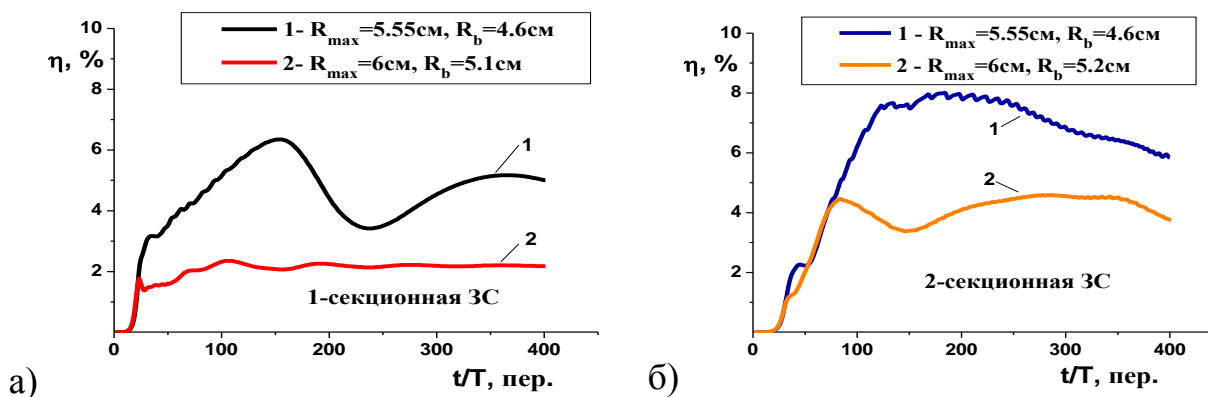
Рисунок 5 - Фрагмент дисперсионной характеристики гофрированной системы в области частот  $2\pi$ -вида колебаний, иллюстрирующий фиксацию частоты резонансного возбуждения прямой и обратной волн при изменении продольного волнового числа  $k_z d/\pi$  (точки 1-3).

При поиске резонансов в режиме заданного тока в двухсекционной системе при варьировании длины секций было обнаружено, что значение величины частоты ближайшего к  $2\pi$ -виду резонанса остается практически неизменным, что отличает режим  $2\pi$ -вида от низшего резонанса в области частот  $\pi$ -вида, характеризующегося сдвигом частоты резонансов поверхностной волны при увеличении длины секции.

Далее было проведено сравнение резонансно-частотных характеристик односекционных систем РДГ в области частот  $2\pi$ -вида колебаний при нескольких близких значениях внешнего радиуса. Анализировалось различие в структуре полей в двух резонансных максимумах, возникающих на РЧХ структуры фиксированного радиуса: ближайшего к частоте  $2\pi$ -вида колебаний и ниже его по частоте резонанса, соответствующего открытию объемной моды  $E_{0n}$  эквивалентного гладкого волновода. Амплитуда этого резонанса объемной моды сильно зависит от радиуса потока и может быть заметной при значительном удалении потока от стенок волновода. Наличие такого резонансного взаимодействия потока и поля соответствует взаимодействию потока с пространственными гармониками «-1» и «+1» моды  $E_{0n}$ . Поскольку положение этого резонанса сильно зависит от радиуса цилиндрического гофрированного волновода, было вычислено такое значение среднего радиуса структуры, при котором 2 указанных резонансных пика совпадают по частоте. Это значение геометрических параметров ЗС далее было использовано в задаче самосогласованного взаимодействия с целью повышения мощности генерации.

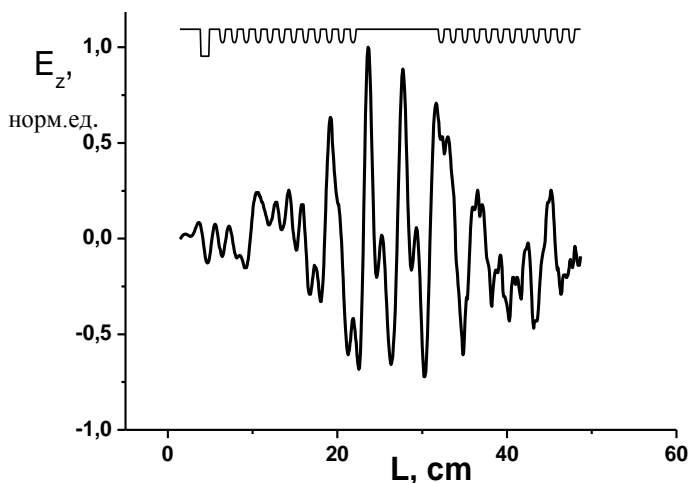
Сравнение процессов установления генерации в двух режимах – при совместном действии 2 механизмов, т.е. совмещении на частотной оси двух резонансных пиков ( $R_{\max}=5.55\text{cm}$ ), и при значительной отстройке двух резонансов ( $R_{\max}=6\text{cm}$ ) – показало значительный выигрыш (в среднем в 2 раза

по величине эффективности взаимодействия) – режима совмещения по сравнению с режимом отстройки. Проблему неустойчивости процесса установления генерации, которую иллюстрирует график 1 на рис. 6а, удалось решить переходом к 2-секционной структуре (рис. 6б). Переход к 2-секционной структуре помимо стабилизации уровня импульса генерации позволил увеличить ее эффективность и расширить диапазон рабочих токов, в котором генерация остается одночастотной.



**Рисунок 6 - Сравнение эффективности взаимодействия потока и поля ЗС по излучению вперед в 1-секционной (а) и 2-секционной (б) системах с неоднородностью «полуторы на пьедестале» в режиме совмещения 2 механизмов ( $R_{\max}=5.55\text{см}$ ) и при значительной отстройке двух резонансов ( $R_{\max}=6\text{см}$ ).**

Это полностью соответствует экспериментальным данным [1]: в эксперименте наибольшие значения мощности и эффективности генерации были получены именно в 2-секционной системе. Объяснение факту стабилизации уровня импульса генерации следует искать в форме распределения продольной компоненты поля  $E_z$  по оси структуры: наличие двух периодических секций приводит к возникновению максимума продольной компоненты поля  $E_z$  в трубе дрейфа, играющей роль высокооборотного резонатора для объемного поля (рис. 7).

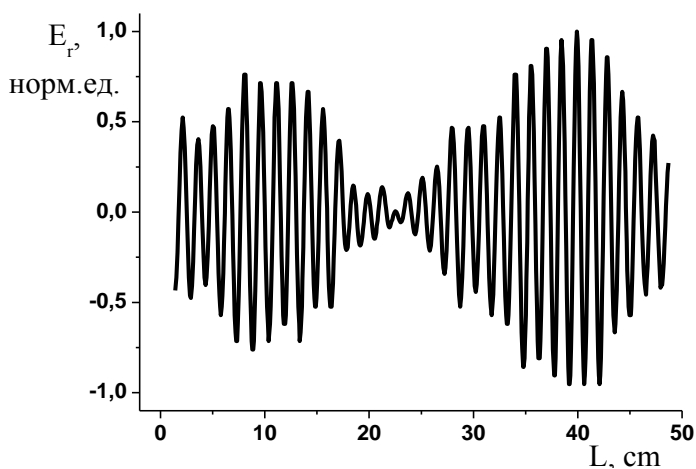


**Рисунок 7 - Распределение продольной компоненты поля  $E_z$  вдоль оси структуры в момент достижения максимальной эффективности генерации ( $t/T \approx 120$ ). Вверху приведена форма поверхности изучаемой структуры.**

Таким образом, численно показано, что совмещение механизмов

дифракционного излучения на критической частоте собственной объемной моды и на частоте  $2\pi$ -вида основной моды периодической структуры приводит к увеличению эффективности и расширению рабочего диапазона тока пучка РДГ, при котором генерация остается одночастотной.

В разделе 5.2.2 рассматривается структура полей, которые устанавливаются в режиме развитой генерации в одно- и двухсекционной структуре РДГ. Для режима установившейся генерации типична форма распределения поперечных компонент поля вдоль структуры, связанная с возбуждением в каждой из двух секций по отдельности продольных мод колебаний с индексом  $N_{пер} - 1$ , где  $N_{пер}$  – число периодов в секции (рис. 8).



**Рисунок 8 - Распределение поперечных компонент поля вдоль оси структуры в режиме установившейся генерации ( $R_{max} = 5.55$  см,  $t > 160$  Т)**

В п. 5.3. изучены стартовые условия и особенности установления генерации в широком диапазоне значений токов пучка и геометрических параметров замедляющей структуры. В разделе 5.3.1 проведен анализ характерных реперных точек на графике процесса развития генерации, которые можно соотнести со временем пролета электронами отдельных секции или всей длины системы. На основе этого анализа приводится объяснение результатов экспериментальных данных, опубликованных в работе [1], сопоставление с которыми легло в основу выбора параметров для численного моделирования в данной работе. В разделе 5.3.2 обсуждаются характеристики поперечных распределений поля для режима совмещения резонансов.

Границы режима устойчивой генерации в структурах с различными длинами секций и трубы дрейфа выявлены в п. 5.4.: а) по току пучка – в пределах от значения выше стартового тока  $J > 4$  кА до верхней границы рабочего диапазона  $J_{пред} = 12$  кА; б) по соотношению между числом периодов в секциях – длина второй секции системы предпочтительно должна составлять от 1 до 1.5 значения величины длины первой секции. В п. 5.5. описаны отличия при установлении генерации в 2-секционной структуре в области частот  $\pi$ -и  $2\pi$ -видов колебаний.

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

### **Основные результаты и выводы**

1. В работе при исследовании дифракционного излучения промодулированного электронного потока в сверхразмерных осесимметричных периодических структурах конечной длины, описываемых **односвязным** или **многосвязным** профилем поверхности, развит вариант метода **интегральных уравнений**, при численном решении которых используются **быстрые алгоритмы** обращения блочно-тёплицевой матрицы с учетом периодичности рассматриваемых структур. Методика позволяет в приближении заданного тока находить наведенные на поверхности токи и поля в объеме сверхразмерных электродинамических систем.
2. Показано сходство механизмов резонансного возбуждения односекционных структур **открытого** и **закрытого** типов вблизи границ полос прозрачности. В области частот  **$\pi$ -вида** колебаний взаимодействие потока и поля достаточно длинной открытой системы (более 15 периодов) характеризуется установлением резонансов продольных колебательных мод поверхностной волны. В области частот  **$2\pi$ -вида** колебаний возбуждение объемных полей в открытых, так же как и в закрытых системах, сопровождается возникновением резонансов **гибридных мод**, у которых структура продольной компоненты электрического поля близка к структуре соответствующей компоненты **объемной моды** эквивалентного гладкого волновода, а радиальная компонента соответствует суперпозиции **объемной моды** меньшего индекса и **поверхностной волны**.
3. Обнаружено, что в односекционных структурах **частота** ближайшего к  **$2\pi$ -виду** резонанса зависит от длины системы значительно слабее, чем в режиме  **$\pi$ -вида**, и **фиксируется** в области частот  **$2\pi$ -вида** при нескольких близких значениях продольного волнового числа или скорости потока аналогично фиксации частоты продольного резонанса поверхностной волны вблизи частоты  **$\pi$ -вида**.
4. При исследовании открытых структур на последовательности торов выявлены различные режимы отклика системы на возбуждение электронным потоком. При значении нормированной частоты  $2d/\lambda \leq 0.7$  и длине менее 15 периодов основной характеристикой возбуждения структуры являются **индивидуальные колебания** полей отдельных торов. С переходом к квазиплоским структурам с диаметром  $D > 13\lambda$  и длиной более 25 периодов проявляются волноведущие и селективные свойства структуры в области частот  **$\pi$ -** и  **$2\pi$ -видов** колебаний с выделением амплитуды этих резонансов над фоновыми пиками объемных мод.

Преобладание амплитуды  $2\pi$ -вида колебаний над амплитудой  $\pi$ -вида особенно заметно при уменьшении зазора между торами (уменьшении распределенных потерь).

5. Численно показано, что **совмещение** механизмов излучения на критической частоте **собственной объемной моды** и на частоте  **$2\pi$ -вида основной моды 2-секционной периодической системы** приводит к увеличению эффективности и устойчивости генерации; расширяет рабочий диапазон тока пучка релятивистского дифракционного генератора, при котором генерация остается одночастотной.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.П. Бугаев, В.И. Канавец, В.И. Кошелев, В.А. Черепенин *Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы* – Новосибирск: Наука, 1991. – 293 с.
2. С.П. Бугаев, А.Н. Власов, В.И. Канавец, А.Д. Копенкин, В.И. Кошелев, В.Н. Корниенко, В.А. Попов, В.А. Черепенин *Релятивистские дифракционные генераторы // Релятивистская дифракционная электроника. Вып. 6.* – Горький: Изд. ИПФ АН СССР, 1990. – С.185-205.
3. Численные методы теории дифракции. Сб. статей. Перев. с англ. Под ред. В.А.Боровикова. – М.: Мир, 1982. – 198 с.
4. Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев *Лекции по сверхвысокочастотной электронике* – М.: Сов. радио, 1973. – 299 с.
5. С.П. Бугаев, В.И. Канавец, А.И. Климов, В.И. Кошелев, В.А. Черепенин *Релятивистские многоволновые генераторы объемных волн // Генераторы и усилители на релятивистских электронных потоках.* – М.: Изд. МГУ, 1987. – С. 106-130.
6. О.А. Вальднер, Н.П. Собенин, Б.В. Зверев, И.С. Щедрин *Диафрагмированные волноводы. Справочник.* Под ред. О.А. Вальднера. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 280 с.
7. Р. Кинг, У. Тай-Цзунь *Рассеяние и дифракция электромагнитных волн* – М.: ИЛ, 1957. – 170 с.
8. Т.Н. Галишникова, А.С. Ильинский *Численные методы в задачах дифракции.* – М.: Изд. МГУ, 1987. – 208 с.
9. А.И. Слепков *Многомодовый метод анализа нестационарных процессов в черенковских генераторах на периодических волноводах // Известия АН. Сер. Физ.* – 2003 – Т. 67. – №12 – С.1678-1683.



## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1\* Власов А.Н., Королёва О.В. Резонансные режимы дифракции электромагнитных полей в периодических ограниченных осесимметричных системах. // Сб. научн. тр. V Всерос. шк.-сем. «Волновые явления в неоднородных средах». – Красновидово, 1996. – С. 23.
- 2\* Власов А.Н., Королёва О.В. Когерентное дифракционное излучение релятивистских электронных потоков в открытых осесимметричных периодических структурах. // Сб. научн. тр. VI Всерос. шк.-сем. «Физика и применение микроволн». – Красновидово, 1997. – С. 29-31.
- 3\* Канавец В.И., Галлямова О.В., Нифанов А.С., Шарыпов К.А. Резонансные эффекты при возбуждении электронным потоком осесимметричных периодических электродинамических структур. // Сб. научн. тр. VII Всерос. шк.-сем. «Волновые явления в неоднородных средах». – Красновидово, 2000. – Т. 2. – С. 23-25.
- 4\* Галлямова О.В., Канавец В.И., Нифанов А.С., Слепков А.С. Соотношение между поверхностными и объемными полями электродинамических систем в релятивистском генераторе дифракционного излучения. // Сб. научн. тр. VIII Всерос. шк.-сем. «Физика и применение микроволн». – Звенигород, 2001. – Ч. 1. – С. 58-60.
- 5\* Галлямова О.В., Канавец В.И. Резонансы в открытом волноводе на последовательности торов релятивистского генератора дифракционного излучения. // Ibid., – С. 60-62.
- 6\* Власов А.Н., Королёва О.В., Максимов А.С. Дифракционное излучение релятивистского электронного потока в открытых периодических линиях. // Известия РАН, сер. Физическая. – 1997. – Т. 61. – №12. – С.2289-2297.
- 7\* Галлямова О.В., Канавец В.И., Нифанов А.С. Резонансные эффекты при возбуждении заданным электронным током осесимметричных периодических электродинамических структур. // Известия РАН. Сер. Физическая. – 2000. Т. 64. – №12. – С. 2497-2503.
- 8\* Галлямова О.В., Канавец В.И., Нифанов А.С., Слепков А.И. Дисперсия и структура волн в высших полосах прозрачности в релятивистском генераторе дифракционного излучения // Известия РАН. Сер. Физическая. – 2000. – Т. 65. – №12. – С. 1703-1707.
- 9\* Слепков А.И., Галлямова О.В. Численное моделирование взаимодействия потока и поля в релятивистском дифракционном генераторе // Сб. научн. тр. XI Всерос. шк.-сем. «Волновые явления в неоднородных средах». – Звенигород, 2008. – С. 71-73.

- 10\* Слепков А. И., Галлямова О.В. Особенности механизмов взаимодействия потока и поля в релятивистском дифракционном генераторе // Сб. научн. тр. IX межвуз. науч. шк. «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». – Москва, 2008. – С. 74-79.
- 11\* Слепков А. И., Галлямова О.В, Гранит Я.Ш. Особенности нестационарных процессов в релятивистском дифракционном генераторе // Сб. научн. тр. XII Всерос. шк.-сем. «Физика и применение микроволн». – Звенигород, 2009. – Ч. 1. – С. 48-50.
- 12\* Slepков A.I., Gallyamova O.V. On features of Smith-Purcell radiation resonant regimes in Relativistic Diffractive Generator // Abstracts of Int. Conf. «Days on Diffraction`2009». – Saint Petersburg, 2009. – P. 86-87.
- 13\* Слепков А. И., Галлямова О.В. Условия самовозбуждения и устойчивости генерации в релятивистском дифракционном генераторе // Сб. научн. тр. X межвуз. научн. шк. «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». – Москва, 2009. – С. 222-227.
- 14\* Слепков А.И., Галлямова О.В. Особенности многоволнового взаимодействия электронного потока и электромагнитного поля в релятивистском дифракционном генераторе // Вестник МГУ, сер. Физика, Астрономия. – 2009. – №4. – С. 30-34.
- 15\* Slepков A.I., Gallyamova O.V. On features of Smith-Purcell radiation resonant regimes in Relativistic Diffractive Generator // Proceed. of Int. Conf. «Days on Diffraction`2009». – Saint Petersburg, 2009. – P. 172-177.
- 16\* Slepков A.I., Gallyamova O.V. Self-excitation and Establishment of Generation in Two-section Relativistic Diffraction Generator // Physics of Wave Phenomena. –2010. – V. 18. – No. 2. – P. 31-35.
- 17\* Слепков А. И., Галлямова О.В. Сравнительный анализ режимов самовозбуждения и устойчивой генерации в двухсекционном релятивистском дифракционном генераторе с различной длиной секций // Тр. XII Всерос. шк.-сем. «Физика и применение микроволн». – Звенигород, 2010. – Ч. 1 – С. 63-65.
- 18\* Gallyamova O.V., Slepков A.I., Granit J.A. Smith-Purcell Radiation Resonant Regimes in Open Type Waveguide on Tori Sequence in Relativistic Diffraction Generator // Abstracts of Int. Conf. «Days on Diffraction`2010». – Saint Petersburg, 2010. – P. 31-32.