

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ  
им. А.Я.Усикова

Грицунов Александр Валентинович

УДК 621.385.6

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ  
ПРОИЗВОЛЬНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА  
ЗАМКНУТЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ  
В СИСТЕМАХ СО СКРЕЩЕННЫМИ ПОЛЯМИ**

01.04.04 – физическая электроника

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Харьков – 2006 г.

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Харьковском национальном университете радио-электроники Министерства образования и науки (МОН) Украины

Научный консультант      доктор физико-математических наук, профессор  
**Чурюмов Геннадий Иванович,**  
Харьковский национальный университет радио-электроники МОН Украины, профессор кафедры физических основ электронной техники

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Лукин Константин Александрович,**  
Институт радиопизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины, заведующий отделом нелинейной динамики электронных систем

доктор физико-математических наук, профессор  
**Шматько Александр Александрович,**  
Харьковский национальный университет МОН Украины, профессор кафедры электроники СВЧ

доктор физико-математических наук, профессор  
**Дробахин Олег Олегович,**  
Днепропетровский национальный университет МОН Украины, профессор кафедры физики СВЧ

Ведущая организация      Сумской государственный университет МОН Украины, кафедра физической электроники

Защита состоится "13" апреля 2006 г. в 15 часов на заседании специализированного ученого совета Д 64.157.01 Института радиопизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины (ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, 61085).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института радиопизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины.

Автореферат разослан "13" марта 2006 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета

А.Я.Кириченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Среди важнейших научно-технических задач, возникающих перед Украиной в процессе ее интеграции в европейские и трансатлантические структуры, следует выделить: развитие высокоскоростных цифровых телекоммуникационных систем (стационарных и мобильных); обновление сети станций сопровождения и управления воздушным движением; разработку радиолокационной и радионавигационной аппаратуры, обеспечивающей обнаружение, распознавание и слежение одновременно за большим числом целей, выявление и сопровождение малоскоростных объектов на небольших высотах, локацию космических летательных аппаратов и др.

Решение поставленных задач возможно лишь путем использования современных и перспективных подходов к конструированию радиоэлектронных систем, в частности, электронного управления уровнем и направлением излучаемой электромагнитной энергии, генерации и усиления набора сложных многочастотных сигналов с амплитудной, частотной и фазовой манипуляцией, применения сложного кодирования данных и нетрадиционных видов модуляции и т.д. Необходимо использовать новые типы сигналов, такие как сверхширокополосные электромагнитные импульсы с короткими (субнаносекундными) параметрами, излучения с быстрым изменением частоты в широких пределах и др. Прослеживается тенденция к все более широкому применению мощных электромагнитных колебаний со сложным широкополосным спектром, который может существенно меняться в зависимости от режима работы системы и передаваемой информации. В связи с этим на первый план выходит *проблема электромагнитной совместимости (ЭМС)* радиоэлектронных средств.

Сейчас возникло противоречие между требованиями радиотехники и возможностями электроники в реализации активных элементов, позволяющих осуществлять генерацию и усиление широкополосных и сверхширокополосных СВЧ-сигналов произвольной формы с большой мощностью и малыми побочными излучениями. Возможности полупроводниковых приборов здесь ограничены, а из работ ведущих специалистов по вакуумной электронике (В.Б.Байбурин, Б.Е.Железовский, Е.М.Ильин, А.А.Кураев, А.Г.Шеин, Т.М.Antonsen, Jr., D.Chernin, Н.Р.Freund, D.M.Goebel, В.Levush и др.) следует, что, несмотря на успехи, достигнутые в повышении мощности, улучшении качества спектра и уменьшении нелинейных искажений вакуумных СВЧ-приборов, развитие их для нужд связи, вещания и радиолокации сдерживается:

– нелинейностью продольного взаимодействия электронных потоков с замедленными электромагнитными волнами, приводящая к недопустимо высокому уровню искажений при усилении сложных (многоканальных цифровых) сигналов линейными усилителями О-типа;

– повышенным уровнем шумов и побочных колебаний, а также низким коэффициентом усиления при взаимодействии в скрещенных полях, ограничивающими область применения линейных и нелинейных усилительных и генераторных приборов М-типа.

Одна из трудностей преодоления этих ограничений заключается в несоответствии существующей теории взаимодействия электромагнитных полей с электронными потоками (разработанной в середине прошлого века для изучения усиления и генерации узкополосных аналоговых сигналов) задачам сегодняшнего дня, например, анализу прохождения через усилительные каскады цифровых сигналов со сложным широкополосным спектром. Необходимо углубленное теоретическое исследование процессов, происходящих при нелинейном взаимодействии электромагнитных волн произвольного спектрального состава с электронными потоками, основанное на адекватном математическом аппарате. Однако, несмотря на многократные попытки аналитического и численного описания возбуждения негармонических колебаний в СВЧ-приборах, до настоящего времени отсутствовала единая методология решения данной задачи. Этим объясняется ограниченность имеющихся результатов. Ни в одной из известных теоретических работ не проанализированы спектры сигналов СВЧ-приборов в континууме частот, не исследована эволюция спектральных зависимостей в течение переходных процессов, анализируемый частотный диапазон ограничен гармониками заранее выбранной «фундаментальной» частоты и т.д.

Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью выработки единого научного подхода к теоретическому анализу возбуждения распределенными электронными потоками негармонических электромагнитных полей в электродинамических системах (ЭС) СВЧ-приборов. Он необходим для оценки нелинейности механизма продольного взаимодействия электромагнитных волн с заряженными пучками, изучения и устранения причин повышенного уровня шумов и побочных колебаний в приборах М-типа и т.д. Аналогичные задачи, несомненно, возникнут при исследовании распределенного взаимодействия немонохроматических электромагнитных волн, включая сверхширокополосные электромагнитные импульсы, с различными нелинейными средами.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Тематика диссертации соответствует научным программам НАН Украины и

Министерства образования и науки Украины: «Взаимодействие электромагнитного излучения и потоков заряженных частиц с веществами», «Фундаментальные исследования в области миллиметровых и субмиллиметровых волн и использование их результатов в народном хозяйстве», «Перспективные информационные технологии, приборы комплексной автоматизации, системы связи».

Диссертационная работа содержит результаты исследований, выполненных автором в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) в 1985–2000 г.г., вошедшие в отчеты по хоздоговорным и госбюджетным НИР отраслевой научно-исследовательской лаборатории «Электроника», кафедр МЭЭПУ, ФОЭТ и ОРТ ХНУРЭ. К ним относятся (в скобках отмечена роль автора): НИР 534, номер государственной регистрации 0197 U 000072 (ответственный исполнитель), НИР 610213К, № 0198 U 000031 (исполнитель), «Перспективы использования электромагнитного излучения миллиметрового диапазона в ускорительной технике», № 0197 U 014155 (исполнитель), «Разработка энергоэффективных и экологических технологий и технических средств использования электромагнитной энергии в промышленном и агропромышленном комплексе», № 0101 U 005127 (исполнитель), а также ряд предыдущих НИР, не подлежавших государственной регистрации.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является развитие теории нелинейного взаимодействия негармонических электромагнитных полей с пространственно распределенными электронными потоками для выяснения физических явлений, приводящих к повышенному уровню шумов и побочных колебаний в приборах со скрещенными статическими электрическим и магнитным полями.

Основные задачи исследования:

– разработка методов адекватного математического моделирования негармонических колебаний, возникающих при нелинейном взаимодействии распределенных в пространстве электронных потоков с электромагнитными волнами направляющих ЭС в скрещенных полях;

– спектральный анализ колебаний зарядов, токов, полей и т.д. с приемлемым частотным разрешением и точностью оценки частоты отдельных гармонических компонент на выборках ограниченной длины. Адаптация параметрических методов спектрального оценивания функций к особенностям временных последовательностей параметров исследуемых приборов, в частности, существенным изменениям спектральных характеристик колебаний в течение переходного режима (эволюция от шумового процесса к квазигармоническому и наоборот);

– теоретическое изучение динамических явлений, происходящих в замкнутом облаке объемного заряда в скрещенных полях при отсутствии высокочастотного электромагнитного поля ЭС (статический режим приборов М-типа), с целью выяснения физики предгенерационных состояний электронного потока, выявления причин, вызывающих повышенный уровень шумов и побочных колебаний в таком режиме;

– анализ колебательных процессов при взаимодействии замкнутого электронного потока с электромагнитным полем стоячих и бегущих замедленных волн ЭС в скрещенных полях (динамический режим приборов М-типа), позволяющий выяснить механизм влияния нелинейного взаимодействия и конкуренции видов колебаний ЭС, волн и турбулентностей объемного заряда на форму спектра выходного сигнала приборов, в том числе во время переходных процессов;

– выяснение физических причин генерации в магнетронных усилителях обратной волны с замкнутым электронным потоком и катодным возбуждением паразитных видов колебаний (в частности, карматронного), ограничивающих коэффициент усиления таких приборов. Разработка технических мер для устранения данных причин и повышения тем самым коэффициента усиления двухрядных усилителей М-типа.

*Объект исследования* – колебательные явления в нелинейных системах, содержащих замкнутые электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными волнами ЭС в скрещенных полях.

*Предмет исследования* – временные и частотные зависимости (спектры) колебаний указанных систем.

*Методы исследования* – численное моделирование на ЭВМ (вычислительный эксперимент), позволяющее адекватно решить самосогласованную задачу о нелинейном взаимодействии электронного потока с немонохроматической электромагнитной волной ЭС в скрещенных полях вблизи распределенной эмиттирующей поверхности; параметрический спектральный и гармонический анализ, дающий возможность оценить частотные зависимости колебаний моделируемой системы с достаточной точностью и разрешающей способностью.

**Научная новизна полученных результатов.** В диссертационной работе развит и обобщен теоретический подход к исследованию нелинейного взаимодействия негармонических электромагнитных полей ЭС с распределенными электронными потоками. При этом впервые:

– методика анализа возбуждения нестационарных негармонических электромагнитных полей в нелинейных колебательных системах, содержащих ЭС и электронные потоки, объединена с параметрическими методами спектрального оценивания и гармонической декомпозиции времен-

ных зависимостей выходных параметров этих систем (так называемый спектральный подход к моделированию СВЧ-приборов) [9, 23];

– введены так называемые парциальные моды произвольной ЭС как линейное преобразование пространства квадратично-интегрируемых собственных функций системы, локализирующее все парциальные функции. Записано нестационарное матричное уравнение для мгновенных значений парциальных мод. Рассчитаны электродинамические параметры парциальных мод регулярной ЭС исходя из параметров ее нормальных мод [10, 12, 13, 24];

– введены регулярные моды продольно-однородной или продольно-периодической ЭС как комплексные огибающие собственных функций системы в продольном направлении. Записано нестационарное уравнение для мгновенных значений регулярных мод в произвольной ЭС. При расчете возбуждения электромагнитных полей в ЭС предложено использовать релятивистские четырехвекторы потенциала и плотности тока [11, 25];

– формулы интерполяции полей между узлами трехмерной пространственной сети дискретизации обобщены на четвертую (временную) координату. Внедрен новый способ интерполяции «Polynomials With Smoothing» (PWS). Предложена адаптивная модификация метода комплексных амплитуд, основанная на динамическом выборе базовых частот комплексных огибающих спектральных компонент поля в процессе моделирования, исходя из текущего спектра колебаний электронного потока [17, 21, 27];

– классифицированы различные виды самопроизвольной группировки замкнутого электронного потока в скрещенных полях вблизи распределенного катода в сгустки. Установлено различие между собственными тангенциальными модами втулки, вторично-эмиссионными сгустками и конвективными облаками. Сделан вывод, что основной причиной возникновения шумов и других аномальных явлений в закритическом режиме магнетронного диода являются конвективные неустойчивости электронного потока [26, 31];

– изучена временная эволюция спектра электромагнитного поля в процессе возбуждения магнетронных приборов с замкнутым электронным потоком, а также перехода от одного вида колебаний ЭС к другому. Обнаружено расширение спектра выходного сигнала на этапе включения усилителей и автогенераторов за счет одновременного существования двух видов колебаний с близкими частотами: рабочей моды ЭС и собственной моды втулки [30];

– обнаружено существование в электронных спицах устойчивых конвективных облаков объемного заряда, которые могут быть одной из

главных причин повышенного уровня шумов при взаимодействии в скрещенных полях. Изучено влияние на спектр выходного сигнала транзитных конвективных облаков объемного заряда, имеющих место в магнетронах при малых анодных токах [31];

– методом вычислительного эксперимента исследована конкуренция рабочего и карматронного видов колебаний амплитрона. Установлено, что при недостаточной входной мощности спектр выходного сигнала в этом приборе существенно расширяется за счет появления сетки близко расположенных комбинационных частот [23];

– установлены причины ограничения коэффициента усиления магнетронных усилительных систем с катодным возбуждением (в частности, двухрядных амплитронов). Предложен метод повышения коэффициента усиления этих приборов, заключающийся в использовании одной или двух областей группировки, смещенных относительно пространства взаимодействия в направлении силовых линий индукции внешнего магнитного поля [29], [32].

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы определяется корректностью уравнений, положенных в основу использованных математических моделей, а также аргументированностью допущений и приближений. Правильность результатов контролировалась путем сравнения их частных случаев с известными ранее экспериментальными и теоретическими данными.

Совокупность новых результатов, приведенных в работе, является существенным вкладом в развитие теории взаимодействия электромагнитных полей с веществом. Предложенный спектральный подход к моделированию СВЧ-приборов – очередной логически закономерный шаг в совершенствовании методов теоретического исследования физических процессов в электронных приборах.

**Практическое значение полученных результатов** состоит в следующем:

– предложенный спектральный подход к моделированию СВЧ-приборов, в отличие от существовавших ранее одно- и многочастотных моделей, позволяет адекватно исследовать негармонические колебательные процессы, имеющие место при нелинейном взаимодействии электромагнитных полей с электронными потоками. Это дает возможность повысить качественные характеристики разрабатываемых приборов (в частности, их линейность и уровень побочных излучений), так как появляется универсальный, дешевый и надежный способ проверки и анализа предлагаемых технических решений, обладающий к тому же неизмеримо большими возможностями диагностики, чем реальный эксперимент;

– разработанная методика моделирования возбуждения немонахроматических полей в ЭС СВЧ-приборов путем декомпозиции их в парциальные и регулярные моды, обладающая преимуществами по сравнению с разложением полей в нормальные моды ЭС, может найти применение при решении актуальных задач радиофизики и электроники (например, анализе взаимодействия ультракоротких электромагнитных радио- и видеоимпульсов с активными и пассивными материальными средами);

– исследование колебаний замкнутого электронного потока в статическом и динамическом режимах магнетронных приборов методом вычислительного эксперимента привело к установлению ранее не известных физических механизмов, создающих повышенный уровень побочных колебаний и шумов при взаимодействии в скрещенных полях. К ним относятся вторично-эмиссионные сгустки, конвекционные и турбулентные явления в электронном потоке. Это позволяет разработать меры по уменьшению негативного влияния таких процессов на качество спектра сигнала генераторов и усилителей М-типа;

– изучение временных и спектральных характеристик электромагнитных полей и конкуренции мод в переходных и стационарных режимах приборов М-типа выявило причины, ухудшающие качество спектра сигнала и ограничивающие коэффициент усиления, что дало возможность выработать предложения по улучшению качественных показателей магнетронных усилителей;

– идеи, методы, алгоритмы и программы, разработанные при выполнении данной диссертационной работы, помимо радиофизики и физической электроники могут найти применение в других областях науки и техники, например, при обработке радиотехнических и биомедицинских сигналов, при проектировании электрофизических установок (ускорителей заряженных частиц и т.п.), в физике плазмы, ядерной физике и т.д.

Результаты диссертационного исследования, в частности, методы численного анализа электромагнитных полей, заряженных пучков и программная система TULIPgm для нестационарного и спектрального моделирования магнетронных приборов использовались в НП ОАО «Фаза» (г. Ростов-на-Дону, Россия) и ЗАО «Тантал-Наука» (г. Саратов, Россия) при разработке усилителей и генераторов М-типа. Разработанные алгоритмы и программы внедрены в учебный процесс и применяются в курсах «Методы преобразования сигналов», «Методы математической физики» и «Теория колебаний и волн», читаемых автором студентам факультета электронной техники ХНУРЭ.

**Личный вклад соискателя.** Все основные идеи, научные положения и результаты, выносимые на защиту, разработаны автором диссертации.

ционной работы самостоятельно. Часть второстепенных результатов получена совместно с соавторами, фамилии которых указаны в списке основных публикаций наряду с фамилией автора.

В работах [3], [4], [15], [16], [17], [18], [19], [21] и [22] автором диссертации разработан математический аппарат и алгоритмы его реализации. В [5] им создана двумерная модель магнетрона и выполнены расчеты прибора, в [6] и [30] предложена идея вычислительных экспериментов, разработана программная система для их осуществления и дана физическая интерпретация полученных результатов. В [29] автором диссертации выявлена причина ограничения коэффициента усиления двухрядного амплитрона и предложен способ ее устранения. В [28] он участвовал в разработке трехмерной математической модели и программы.

Результаты, полученные другими лицами (формулы, методы, данные теоретических и экспериментальных исследований и др.), на которые ссылается соискатель, отмечены в тексте диссертации цитированием соответствующих публикаций.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертационной работы после 2000 г. были представлены на следующих конференциях: Международная межвузовская конференция «Современные проблемы электроники и радиофизики СВЧ» (г. Саратов, Россия, 2001 г.); 7-я Международная конференция «Теория и техника передачи, приема и обработки информации» (г. Туапсе, Россия, 2001 г.); 11-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2001 г.); International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (г. Львов, Украина, 2002 г.); III IEEE International Vacuum Electronics Conference (г. Монтерей, США, 2002 г.); XIV International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (г. Гданьск, Польша, 2002 г.); 16th International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (г. Вроцлав, 2002 г.); 12-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2002 г.); IV IEEE International Vacuum Electronics Conference (г. Сеул, Южная Корея, 2003 г.); XVIII International Workshop on Charged Particle Accelerators (г. Алушта, Украина, 2003 г.); V IEEE International Vacuum Electronics Conference (г. Монтерей, 2004 г.); V International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (г. Харьков, 2004 г.); International Euro Electromagnetics Conference (г. Магдебург, Германия, 2004 г.); International Symposium on Electromagnetic Compatibility (г. Эйндховен, Нидерланды, 2004 г.).

Результаты работы дискутировались на научных семинарах кафедр МЭЭПУ и ФОЭТ ХНУРЭ, в ХНУ им. В.Н.Каразина (г. Харьков), СГУ (г. Сумы, Украина), РГУ (г. Ростов-на-Дону), обсуждались в ИРЭ НАНУ, НП ОАО «Фаза» (г. Ростов-на-Дону), ЗАО «Тантал-Наука» (г. Саратов) и др.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 68 научных трудах, включающих 31 статью (из них 17 без соавторов), 32 тезисов докладов, 2 авторских свидетельства СССР и 3 патента Украины.

Статьи опубликованы в национальных и зарубежных профильных научных журналах и сборниках научных трудов, вошедших в перечень научных профильных изданий Украины, где могут публиковаться результаты диссертаций на соискание научных степеней.

Список основных публикаций по теме диссертации, содержащий 48 наименований, приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, семи разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем диссертации составляет 430 страниц, включающих 364 страницы основного текста с 90 рисунками, 28 страниц списка использованных источников из 285 наименований, 38 страниц приложений с 8 рисунками.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дается общая характеристика диссертационной работы. Путем анализа современного состояния решаемой проблемы обосновывается актуальность и целесообразность работ по выбранной теме. Формулируется цель, задачи и методы исследований. Определены научная новизна и практическое значение полученных результатов. Приводятся сведения об апробации работы и количестве публикаций по ее тематике.

**Первый раздел** диссертации содержит обзор литературы, позволяющий проследить основные этапы развития компьютерных исследований процессов нелинейного взаимодействия электромагнитных волн с распределенными электронными потоками. Показано, что спектральный подход к моделированию таких явлений является закономерным очередным этапом многолетней эволюции методов теоретического изучения потоков частиц в вакууме и полупроводнике на микроуровне. Описаны общие принципы спектрального моделирования и дано определение спектральной модели СВЧ-прибора. Рассмотрены способы практического построения таких моделей, выделено несколько их уровней, различающихся, в основном, методикой расчета электромагнитных полей.

Интенсивное развитие компьютерных исследований процессов взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами началось после появления возможности решать на ЭВМ нелинейные уравнения метода самосогласованного поля (O.Buneman, R.W.Hockney, G.P.Kooyers, S.P.Yu). С тех пор две основные составляющие алгоритма вычислительного эксперимента в электронике (решение кинетического уравнения для потоков заряженных частиц и уравнений Максвелла для полей) эволюционировали в неравной степени. Техника моделирования динамики объемного заряда осталась практически неизменной, кинетическое уравнение решается, как правило, методом макрочастиц. Внесены лишь два существенных усовершенствования: созданы «полноформатные» модели, основанные на одновременном рассмотрении динамики частиц во всем пространстве прибора (D.M.MacGregor, A.B.Грицунов) и разработаны трехмерные модели (A.B.Галаган, B.M.Писаренко, A.A.Терентьев, A.A.Шадрин).

Методика решения полевых уравнений претерпела, напротив, ряд изменений. В некоторых случаях для этого используется непосредственное интегрирование уравнений Максвелла методом конечных разностей или конечных элементов. Однако большинство работ базируется на так называемых одночастотном или многочастотном приближениях, т.е. рассмотрении соленоидальных полей как суперпозиции одной или нескольких временных гармоник Фурье с априорно заданными частотами. Такой подход малопригоден при изучении спектров сигналов, так как невозможно заранее знать частоты и соответствующие нормальные моды ЭС для всех побочных колебаний в многомодовой системе.

Поэтому важным этапом развития моделирования полей в СВЧ-приборах был переход к решению уравнения возбуждения для колебательных систем со многими степенями свободы, так называемому многоволновому приближению (M.I.Петелин, B.A.Черепенин, G.E.Dombrowski и др.). К сожалению, известные реализации такого подхода применительно к ЭС приборов М-типа ограничены приближением сосредоточенных элементов. Оно не учитывает изменение структуры поля ячеек ЭС с частотой, непригодно для анализа полей, имеющих соленоидальную составляющую в пространстве взаимодействия (например, 0-вида) и т.п.

Предложенный в диссертационной работе спектральный подход к моделированию СВЧ-приборов является логическим продолжением эволюции методов теоретического анализа нелинейных колебательных систем, содержащих ЭС и электронные потоки. Его главная особенность – одновременный учет всех существенных временных гармоник колебаний в континууме частот и получение частотных зависимостей колебательных процессов, как естественного результата расчета.

Общий алгоритм спектрального подхода состоит в следующем. На входе ЭС задается определенный спектр высокочастотного сигнала. Путем Фурье-синтеза электромагнитное поле в данном месте трансформируется во временную область и используется как граничное условие (ГУ) нестационарной модели. После моделирования прохождения синтезированной таким образом негармонической электромагнитной волны через ЭС с учетом ее нелинейного взаимодействия с электронным потоком, временная выборка ВЧ-сигнала на выходе прибора, наряду с другими выходными параметрами подвергается спектральному анализу для перевода ее обратно в частотную область. Полученные частотные зависимости можно изобразить в графическом виде и наблюдать на мониторе временную динамику их изменения при переходном процессе, подобно тому, как это происходит на экране спектроанализатора. Для несинхронизированных автогенераторов первый этап алгоритма опускается. Очевидно, что спектральный подход является третьим (после одно- и многочастотного) методом учета частотных зависимостей колебательных процессов в СВЧ-приборах.

*Таким образом, спектральная модель СВЧ-прибора – это нестационарная модель, корректно учитывающая взаимодействие между всеми временными гармониками электромагнитного поля электродинамической системы и электронным потоком в континууме частот, объединенная с алгоритмами спектрального синтеза входных сигналов и спектрального анализа выходных параметров.*

Для различных применений спектрального моделирования частотные диапазоны, в которых должны учитываться процессы взаимодействия частиц с полем, могут различаться на порядок и более. Чтобы перекрыть весь возможный диапазон приложений спектральной методики, выделяются четыре уровня спектральных моделей, отличающиеся методами решения уравнений Максвелла для электромагнитных полей.

Нулевым уровнем следует считать непосредственное решение уравнений Максвелла в пространстве взаимодействия сеточными методами. Эта методика наиболее универсальна, поскольку она почти свободна от каких-либо физических приближений. Однако погрешности в задании ГУ на ограниченном количестве узлов сети дискретизации, а также трудоемкость этого процесса, все еще препятствуют использованию ее при расчете параметров реальных приборов.

Модели первого уровня основаны на частичном разделении переменных, т.е. нахождении решений уравнений Максвелла в виде суперпозиции произведений функций координат (мод ЭС) на функции времени и, возможно, продольной координаты (мгновенные значения мод). В кон-

кретном приборе моды рассчитываются однократно, а на каждом временном шаге вычисляются лишь их временные/продольные коэффициенты.

Модели второго уровня отличаются от предыдущих тем, что мгновенные значения мод рассматриваются как суммы нескольких узкополосных компонент и вычисляются комплексные огибающие каждой из них.

Модели третьего уровня основаны на рассмотрении СВЧ-прибора как активного нелинейного четырехполосника, передаточная характеристика которого определяется исходя из неких упрощенных предположений относительно поведения электронного потока (аналитический подход).

**Во втором разделе** описана методика спектрального и гармонического анализа временных выборок, получаемых в результате нестационарного численного моделирования СВЧ-приборов. Показано, что ограничения классических методов частотной оценки не позволяют использовать их при спектральном моделировании. Описаны результаты испытаний нескольких параметрических методов, которые позволили отобрать среди них наиболее подходящие для данной цели. Выбранные алгоритмы подвергнуты усовершенствованию в целях их адаптации к временным выборкам, типичным при исследовании нестационарных процессов в скрещенных полях, и требованиям спектральных моделей второго уровня.

Анализ спектров временных зависимостей напряжений, токов, напряженностей поля и др. является заключительным этапом спектрального моделирования. Помимо исследования частотных зависимостей выходных параметров, гармоническое разложение используется в моделях второго уровня для фильтрации составляющих возбуждающего тока. Классические методы спектрального оценивания (периодограммный, коррелограммный) обладают недостаточной разрешающей способностью и точностью оценки частоты отдельных гармонических компонент. Поэтому спектральное моделирование СВЧ-приборов стало возможным только после введения в практику параметрических методов.

Наиболее подходящими для спектрального анализа токов, зарядов и других физических величин (за исключением электромагнитных полей ЭС) являются статистические методы, основанные на модели авторегрессионного процесса. Это связано, прежде всего, с их способностью выделять максимумы спектральной плотности мощности на отдельных частотах, что важно при анализе наличия побочных колебаний электронного потока. Другие модели на базе рациональных функций – скользящего среднего и комбинированные – не обладают указанным преимуществом либо недостаточно исследованы.

Результаты сравнения наиболее известных авторегрессионных алгоритмов подтверждают, в частности, лучшие качественные показатели (час-

тотное разрешение и точность оценки частоты) ковариационных методов по сравнению с методами максимальной энтропии. Но ковариационные алгоритмы менее устойчивы при работе со слабо зашумленными выборками и более чувствительны к ошибкам округления. Поскольку близкие к гармоническим временные последовательности типичны для рабочих режимов СВЧ-приборов, необходимо принять меры к повышению устойчивости этих алгоритмов.

Одним из способов является доработка, автоматизирующая выбор порядка метода для каждой временной последовательности. Первоначально используется предполагаемый (оптимальный для данной выборки) порядок, а в процессе рекурсий, при невозможности их продолжения, сохраняются полученные к этому времени значения дисперсии и коэффициентов линейного предсказания, как если бы изначально был задан порядок модели, равный наибольшему достигнутому в ходе основного цикла. Доработанные таким образом ковариационные алгоритмы устойчиво функционируют при отношении сигнал/шум до 120 дБ включительно, выбирая максимально возможный (но не выше оптимального) для данной последовательности порядок модели.

Гармонический анализ электромагнитных полей, а также возбуждающего тока в моделях второго уровня, рекомендуется выполнять с помощью детерминированных методов, что вызвано необходимостью точного расчета амплитуд и фаз гармоник анализируемого процесса. К ним относятся, в частности, исходный метод Прони (гармоническая интерполяция) и метод наименьших квадратов Прони (гармоническая аппроксимация). В обоих случаях предпочтительным является разложение по незатухающим комплексным экспонентам.

При декомпозиции возбуждающего тока предложено комбинировать гармоническую интерполяцию исходной функции на этапе вычисления частот комплексных экспонент с ее аппроксимацией для нахождения амплитуд и фаз гармоник. Это обеспечивает заметно лучшую стабильность алгоритма для плохо обусловленных выборок по сравнению с обобщенным методом наименьших квадратов Прони, но большую точность вычисления амплитуд и фаз гармоник, чем в исходном подходе Прони.

Одним из этапов детерминированных методов является факторизация характеристического полинома, составленного из коэффициентов авторегрессионного фильтра. Многие применения спектрального подхода требуют высоких порядков модели, например, 128 или 256. Известные алгоритмы факторизации не в состоянии работать с полиномами такой степени. Причина заключается в накоплении ошибок округления коэффициентами полинома в процессе понижения его степени после нахождения

очередного нуля. Чтобы уменьшить среднеквадратичную погрешность, рекомендовано использовать два критерия сходимости: «слабый» и «сильный». Слабый соответствует критерию известных алгоритмов. Сильный достигается, когда абсолютная величина многочлена становится меньше минимально возможной ошибки округления при вычислении его значения. В результате погрешность расчета корней уменьшается ценой увеличения времени факторизации (в 2 ... 3 раза). Модифицированные подобным образом алгоритмы удовлетворительно функционируют с полиномами степени до 256 включительно.

Для оценки возможностей параметрических алгоритмов на рис. 1 показаны зависимости их разрешающей способности от числа спектральных компонент в узкополосном сигнале для модифицированного ковариационного метода (а) и исходного метода Прони (б). Они получены для выборки длиной  $\Delta T$  из 256 элементов, в спектре которой присутствует группа из  $h = 2 \dots 8$  комплексных экспонент одинаковой амплитуды с нулевой начальной фазой, равноудаленных друг от друга по частоте, со средней частотой, равной  $1/16$  частоты дискретизации. По вертикальной оси отложен логарифм отношения частотного разрешения классического метода  $2\pi/\Delta T$  к аналогичному значению параметрического метода  $\Delta\omega$ . Кривая 1 на рис. 1 (б) получена для незашумленной последовательности, кривая 1 на рис. 1 (а) и кривая 2 на рис. 1 (б) – при наличии аддитивного белого шума со среднеквадратичным значением  $-120$  дБ от амплитуды гармоники; кривая 2 на рис. 1 (а) – для аналогичной зашумленности с уровнем  $-60$  дБ. Видно, что преимущества параметрических алгоритмов сохраняются даже для

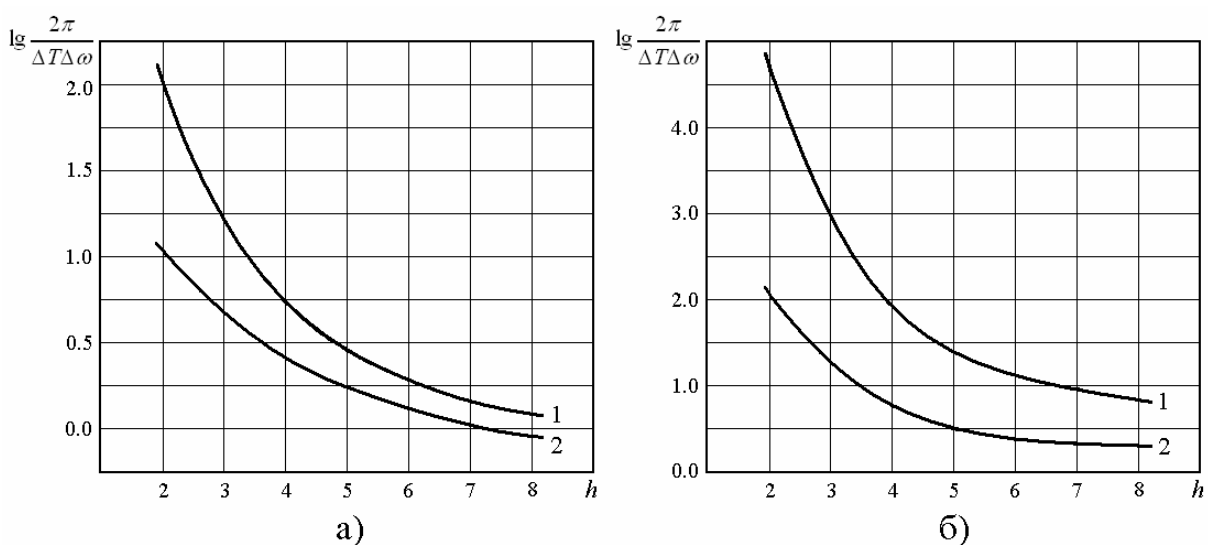


Рис. 1. Зависимости разрешающей способности параметрических алгоритмов от числа гармонических компонент

сигналов с достаточно сложным спектром.

**Третий раздел** содержит описание методов нестационарного моделирования возбуждения немонохроматических электромагнитных полей в дискретном приближении электродинамической системы. Определены парциальные моды нерегулярной и регулярной ЭС. Выведено матричное уравнение возбуждения парциальных мод. На примере простейших ЭС в виде цепочек связанных резонаторов (ЦСР) рассмотрена физическая сущность данного уравнения. Разработана методика расчета матриц электродинамических параметров парциальных мод. Рассмотрены проблемы задания ГУ на входе и выходе ЭС конечной длины.

Скалярный  $\phi(t, x, y, z)$  и векторный  $\vec{A}(t, x, y, z)$  потенциалы ЭС являются решениями неоднородных волновых уравнений с однородными ГУ. В моделях первого и второго уровней они находятся как суммы произведений функций координат (мод ЭС) на функции времени и, возможно, продольной координаты.

Дискретное приближение основано на разложении потенциалов ЭС в ряды по нормальным или парциальным модам, являющихся элементами функционального пространства Гильберта  $L^2$ , например, для векторного потенциала:

$$\vec{A}(t, x, y, z) = \sum_q \vec{A}_{pq}(x, y, z) \mathbf{u}_{pq}(t). \quad (1)$$

Вектор парциальных мод  $\vec{A}_{pq}$  определяется отдельно для каждого типа волны (полосы пропускания) ЭС  $q = 0, 1, 2, \dots$  и является нетривиальным решением матричного уравнения Гельмгольца

$$\nabla^2 \vec{A}_{pq}(x, y, z) + [k_{pq}^2] \vec{A}_{pq}(x, y, z) = 0$$

в объеме ЭС с однородными ГУ. Поскольку анализируемая полоса частот конечна, длина вектора  $N$  и количество учитываемых типов волн ограничены.  $[k_{pq}^2]$  – матрица квадратов взаимных волновых чисел парциальных мод размером  $N \times N$ .

Векторы нормальных  $\vec{A}_{rq}$  и парциальных мод соотносятся как:

$$\vec{A}_{rq}(x, y, z) = [F] \vec{A}_{pq}(x, y, z); \quad \vec{A}_{pq}(x, y, z) = [F]^{-1} \vec{A}_{rq}(x, y, z), \quad (2)$$

где  $[F]$  – матрица коэффициентов формы нормальных мод, выбранная так, чтобы локализовать все парциальные моды ЭС в продольном направлении. Продольная локализация парциальных мод обеспечивает преимущества при разработке спектральных моделей. В частности, для приборов бегущей

волны спектр нормальных мод континуален, следовательно, ряд (1) к ним неприменим. Множество же парциальных мод всегда дискретно. Для регулярных ЭС выражения (2) становятся прямым и обратным дискретными преобразованиями Фурье.

Дискретное уравнение возбуждения для мгновенных значений парциальных мод  $\mathbf{u}_{pq}(t)$  имеет вид:

$$\frac{d^2 \mathbf{u}_{pq}}{dt^2} + 2[\delta_{pq}]^T \frac{d\mathbf{u}_{pq}}{dt} + [\omega_{pq}^2]^T \mathbf{u}_{pq} = \frac{1}{2} [\tilde{W}_{pq}]^{-1} \int_{\Delta Z} dz \int_{S_{\perp}} dx dy \bar{\mathbf{A}}_{pq}(x, y, z) \vec{j}(t, x, y, z),$$

где  $\Delta Z$  – длина ЭС;  $S_{\perp}$  – ее поперечное сечение;  $[\omega_{pq}^2] = [k_{pq}^2] / \epsilon_0 \mu_0$ ;  $[\delta_{pq}]$  – матрица коэффициентов затухания парциальных мод;  $[\tilde{W}_{pq}]$  – матрица норм этих мод;  $\vec{j}(t, x, y, z)$  – плотность возбуждающего тока.

Парциальные моды можно трактовать как «облака» электромагнитного поля, колеблющиеся в одинаковой фазе. К ним можно применить теорию колебательных систем со многими степенями свободы, полагая, что вектор  $\mathbf{u}_{pq}$  содержит  $N$  независимых координат для каждого типа волны. Парциальные моды менее абстрактны для регулярных ЭС в виде ЦСР, где их можно связать с полями отдельных ячеек (как в работах С.П.Кузнецова). На рис. 2 (а) изображена продольная составляющая векторного потенциала нулевой парциальной моды в полосе пропускания  $LE_0$  однородной гребенчатой ЭС. Видно, что помимо нулевой полости и прилегающей к ней части пространства взаимодействия, несколько соседних щелей также содержат некое электромагнитное поле. Данное явление не может быть объяснено физически, поскольку поле нулевой щели практически не проникает в другие резонаторы. Поля в соседних щелях являются неотъемлемыми составными частями парциальной моды нулевой полости,

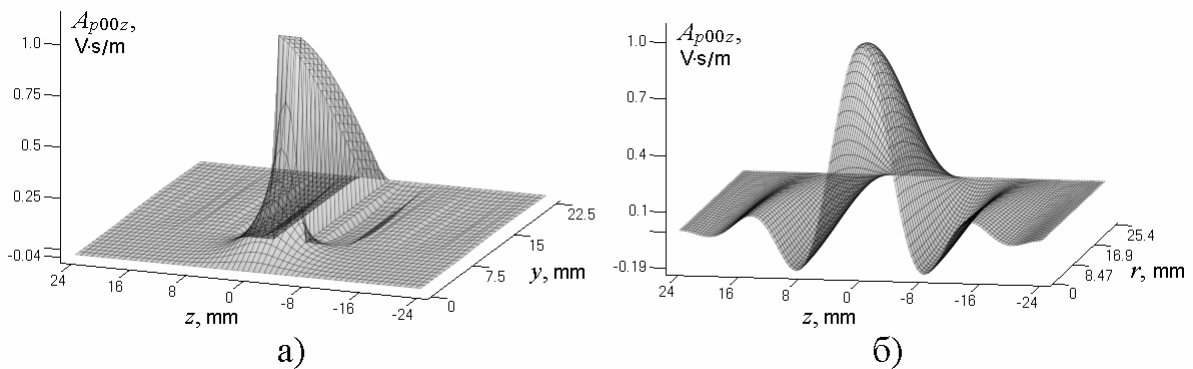


Рис. 2. Парциальные моды гребенчатой замедляющей системы (а) и цилиндрического волновода (б)

осуществляющими частотное изменение структуры поля в зазоре, когда нормальные моды ЭС синтезируются как суперпозиции парциальных мод. На рис. 2 (б) приведена аналогичная составляющая нулевой парциальной моды для волны  $E_{01}$  регулярного цилиндрического волновода.

Методика расчета матриц электродинамических параметров парциальных мод ЭС может быть прямой или косвенной. Первая заключается в непосредственном вычислении элементов этих матриц исходя из геометрии и физических свойств ЭС, вторая – в пересчете их из электродинамических параметров нормальных мод, полученных теоретическим или экспериментальным путем. Расчет коэффициентов уравнения возбуждения парциальных мод регулярной ЭС возможен на базе параметров стоячих волн, либо на основе характеристик бегущих волн.

Разработаны три способа задания ГУ в первых и последних ячейках ограниченной ЭС при использовании дискретного приближения для моделирования режима бегущей волны. Это имитация близкого к идеальному согласования на входном и выходном концах ЭС; моделирование реальных ввода и вывода энергии в первой и последней ячейках; имитация согласованной нагрузки на концах системы. Каждый из этих способов имеет достоинства, недостатки и преимущественную область применения.

**В четвертом разделе** содержится описание методов нестационарного моделирования возбуждения негармонических электромагнитных полей в непрерывном приближении электродинамической системы. Определены регулярные моды регулярной ЭС. Выведено уравнение возбуждения для мгновенных значений этих мод (обобщенное волновое уравнение), которое адаптировано также к спектральным моделям второго уровня. В целях обеспечения калибровки Лоренца для потенциалов предложено использовать релятивистские четырехвекторы потенциала и плотности тока.

Регулярные моды – это комплексные огибающие нормальных мод в продольном направлении, например, для векторного потенциала:

$$\vec{A}_{rqm}(x, y, z) = \vec{A}_{gq}(x, y, z, \beta_m) e^{-i\beta_m z}; \quad \vec{A}_{gq}(x, y, z, \beta_m) = \vec{A}_{rqm}(x, y, z) e^{i\beta_m z},$$

где  $\beta_m$  – постоянная распространения  $m$ -й нормальной моды.

Благодаря своей непрерывности, регулярные моды аппроксимируют поле ЭС в ограниченной полосе частот с большей точностью, чем парциальные. Однако вследствие зависимости функций  $\vec{A}_{gq}$  от постоянной распространения, векторный потенциал может быть найден только путем разложения регулярных мод в ряд Тейлора по  $\beta$ :

$$\vec{A}(t, x, y, z) = \sum_q \left[ \vec{A}_{gq0}(x, y, z) u_{gq}(t, z) + i \frac{\partial \vec{A}_{gq0}}{\partial \beta} \frac{\partial u_{gq}}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \vec{A}_{gq0}}{\partial \beta^2} \frac{\partial^2 u_{gq}}{\partial z^2} - \frac{i}{6} \frac{\partial^3 \vec{A}_{gq0}}{\partial \beta^3} \frac{\partial^3 u_{gq}}{\partial z^3} + \frac{1}{24} \frac{\partial^4 \vec{A}_{gq0}}{\partial \beta^4} \frac{\partial^4 u_{gq}}{\partial z^4} + \dots \right], \quad (3)$$

где  $u_{gq}(t, z)$  – временная и продольная зависимость мгновенного значения регулярной моды для  $q$ -го типа волны. Индекс 0 означает, что величина вычисляется при  $\beta = 0$ .

Непрерывное уравнение возбуждения для функции  $u_{gq}$  имеет вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u_{gq}}{\partial t^2} + 2 \frac{\partial}{\partial t} \left[ \delta_{rq0} u_{gq} - \frac{1}{2} \frac{d^2 \delta_{rq0}}{d\beta^2} \frac{\partial^2 u_{gq}}{\partial z^2} + \frac{1}{24} \frac{d^4 \delta_{rq0}}{d\beta^4} \frac{\partial^4 u_{gq}}{\partial z^4} - \dots \right] + \\ & + (\omega_{rq}^2)_0 u_{gq} - \frac{1}{2} \frac{d^2 (\omega_{rq}^2)_0}{d\beta^2} \frac{\partial^2 u_{gq}}{\partial z^2} + \frac{1}{24} \frac{d^4 (\omega_{rq}^2)_0}{d\beta^4} \frac{\partial^4 u_{gq}}{\partial z^4} - \dots = \\ & = \frac{1}{2D} \int_{z-D/2}^{z+D/2} d\zeta \int_{S_\perp} dx dy \left[ \frac{\vec{A}_{gq0}^*(x, y, \zeta)}{\tilde{W}_{gq0}} \vec{j}(t, x, y, \zeta) - i \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{\vec{A}_{gq}^*}{\tilde{W}_{gq}} \right)_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial z} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left( \frac{\vec{A}_{gq}^*}{\tilde{W}_{gq}} \right)_0 \frac{\partial^2 \vec{j}}{\partial z^2} + \frac{i}{6} \frac{\partial^3}{\partial \beta^3} \left( \frac{\vec{A}_{gq}^*}{\tilde{W}_{gq}} \right)_0 \frac{\partial^3 \vec{j}}{\partial z^3} + \frac{1}{24} \frac{\partial^4}{\partial \beta^4} \left( \frac{\vec{A}_{gq}^*}{\tilde{W}_{gq}} \right)_0 \frac{\partial^4 \vec{j}}{\partial z^4} - \dots \right], \quad (4) \end{aligned}$$

где  $\omega_{rq}(\beta)$  и  $\delta_{rq}(\beta)$  – собственная частота и коэффициент затухания нормальной моды с постоянной распространения  $\beta$  для  $q$ -го типа волны;  $\tilde{W}_{gq}(\beta)$  – погонная норма регулярной моды;  $D$  – период ЭС.

Выражение (4) – это обобщенное волновое уравнение для регулярной ЭС с произвольной геометрией и дисперсионной характеристикой. Классическое волновое уравнение, уравнение Клейна-Гордона и телеграфное уравнение являются его подмножествами. Несмотря на сходство с одномерным волновым уравнением, это полностью трехмерное выражение. Функции  $\vec{A}_{gq}$ ,  $\partial \vec{A}_{gq} / \partial \beta$ ,  $\partial^2 \vec{A}_{gq} / \partial \beta^2$ , ... могут быть получены путем дифференцирования нормальных мод или синтезированы из парциальных мод.

Поскольку ряды в (3) и (4) медленно сходятся при  $\pi/2D < |\beta| \leq \pi/D$ , непрерывное приближение ЭС менее широкополосно, чем дискретное. Поэтому имеет смысл использовать его в спектральных моделях второго уровня.

Сохранение калибровки для потенциалов зависит от точности выполнения условия непрерывности тока моделью электронного потока. Если точное соблюдение этого условия затруднительно, вместо скалярного и векторного потенциалов и плотностей объемного заряда и тока целесообразно использовать релятивистские четырехмерные векторные величины  $\vec{A}^f = (\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \phi, \vec{A})$  и  $\vec{j}^f = (\rho / \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}, \vec{j})$  (четыре-векторы потенциала и плотности тока), которым калибровка Лоренца присуща неотъемлемо.

Когда четырехвектор потенциала используется для описания полей в продольно-однородной ЭС, большинство ее поперечных волновых чисел (критических частот), как минимум, трехкратно вырождены. Два типа волны – это общеизвестные  $TE_{ij}$  ( $H_{ij}$ ) и  $TM_{ij}$  ( $E_{ij}$ ) нормальные моды, имеющие соленоидальные компоненты  $(0, A_x, A_y, 0)$  и  $(0, A_x, A_y, A_z)$  четырехвектора  $\vec{A}^f$  соответственно. Третий тип – мода с потенциальными составляющими  $(A_t, A_x, A_y, A_z)$ , которая может быть обозначена как «Zero Magnetic» ( $ZM_{ij}$ ) или «Potential» ( $P_{ij}$ ). Это «виртуальная» волна, не имеющая компонент электрического и магнитного поля в пустой ЭС, но являющаяся базисом для разложения потенциальной составляющей электрического поля в присутствии электронного потока.

При использовании четырехвекторов регулярные моды и их погонные нормы являются в общем случае функциями частоты и постоянной распространения. Ряды Тейлора в выражениях (3) и (4) при этом модифицируются так, чтобы учесть обе зависимости.

**Пятый раздел** включает в себя описание методологии разработки нестационарных и спектральных моделей СВЧ-приборов, а также их алгоритмической реализации. Основное внимание уделено оригинальным идеям и алгоритмам, не использовавшимся ранее в работах других авторов. К ним относятся, в частности, четырехмерная пространственно-временная интерполяция полей и метод полиномов со сглаживанием (PWS), аппроксимация выходных параметров в нестационарном режиме, автоматизация определения коэффициента кратности макрочастиц и т.д. Разработаны алгоритмы интегрирования дискретного и непрерывного уравнений возбуждения. Предложен адаптивный метод комплексных амплитуд, избавляющий от необходимости априорного задания базовых частот и позволяющий увеличить широкополосность моделей второго уровня.

Интегрирование кинетического уравнения для электронного потока в диссертационной работе осуществляется в подходе Лагранжа (путем решения уравнения движения для координат и скоростей отдельных частиц). Рассматривается одновременно все пространство прибора. Для совместности систем координат введены рабочие переменные. В целом методика

расчета траекторий макрочастиц не отличается от предложенной автором в начале 1980-х г.г. при разработке первых полноформатных моделей.

Однако создание спектральных моделей потребовало принятия ряда мер, направленных на минимизацию временных и пространственных флуктуаций полей, поскольку они ограничивают способность модели выделять слабые гармонические компоненты выходных параметров прибора. Увеличение количества макрочастиц сопряжено с практически пропорциональным ростом длительности расчета нестационарных режимов. Поэтому существенное значение имеет сглаживание (интерполяция) пространственно-временных функций между узлами сети дискретизации в процессе перехода от лагранжевых координат к эйлеровым и обратно.

Известные методы, например NGP, CIC и т.п. основаны на пространственной интерполяции этих функций. В то же время, если при решении уравнения движения макрочастиц используется одношаговый метод, целесообразна также временная интерполяция. Для этого могут быть использованы известные методы (например, CIC), если формально рассматривать время как четвертую координату и проводить интерполяцию между узлами четырехмерной пространственно-временной ячейки. Однако временные затраты могут быть уменьшены при использовании специально разработанного метода «полиномы со сглаживанием» (PWS). Он основан на интерполирующем полиноме первого порядка вида

$$\vec{A}(t, x, y, z) = \vec{a}_0 + \vec{a}_t \cdot (t - t_0) + \vec{a}_x \cdot (x - x_0) + \vec{a}_y \cdot (y - y_0) + \vec{a}_z \cdot (z - z_0),$$

где  $\vec{a}_0, \vec{a}_t, \vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$  – коэффициенты полинома;  $t_0, x_0, y_0, z_0$  – координаты центра четырехмерной ячейки, в которой находится макрочастица.

Выражения для расчета коэффициентов  $\vec{a}_0 \dots \vec{a}_z$ , вместе с обратными формулами для распределения заряда частицы в узлы сети дискретизации, исключаяющими нарушение закона сохранения импульса, являются достаточно простыми. Экстраполяция координаты  $\vec{r}$  и скорости  $\vec{v}$  частицы на конец следующего временного шага (для предсказания значений полей в этот момент) может быть осуществлена с помощью конечно-разностных формул первого порядка для скорости и второго порядка для координаты:

$$\vec{v}_X = \vec{v}_E + (\vec{v}_E - \vec{v}_B); \quad \vec{r}_X = \vec{r}_E + (\vec{v}_E + \vec{v}_X)\Delta t / 2,$$

где индекс  $B$  соответствует началу временного шага  $\Delta t$ , индекс  $E$  – концу этого шага, индекс  $X$  – концу следующего временного шага.

Снизить модельные шумы можно также путем сглаживания во времени результатов расчета. Обычное усреднение приводит к недопустимо большому временному запаздыванию выходных данных при переходном

процессе. Его можно уменьшить, используя линейную регрессионную модель вида  $f(t) = a_0 + a_1 t$  ( $a_0$  и  $a_1$  – коэффициенты линейной регрессии).

Существенным с практической точки зрения усовершенствованием методики моделирования приборов М-типа является автоматизация определения коэффициента кратности макрочастицы для моделей с фиксированным зарядом частиц, исключая необходимость трудоемкого подбора значений этого коэффициента. Расчет его произведен на основе бриллюэновской модели электронного потока.

В разделе рассмотрены также вопросы прямого и косвенного синтеза структур полей и расчета электродинамических параметров парциальных мод ЭС. Выведены уравнения для пересчета квадратов частот, коэффициентов затухания и норм так называемых маркерных нормальных видов колебаний регулярной ЭС в параметры парциальных мод. Описана методика численного интегрирования дискретного уравнения возбуждения. Оптимальными признаны методы прогноза и коррекции, например, схема Адамса-Башфорта четвертого порядка вида  $P(ES)^3E$ . Предложена интерполяция интегралов возбуждения кубическим полиномом с последующим его дифференцированием. Рассмотрены вопросы численного решения непрерывного уравнения возбуждения. Установлено, что конечно-разностные схемы первого порядка аппроксимации не обеспечивают достаточную точность интегрирования при относительной ширине полосы частот сигнала свыше 1 %. Поэтому целесообразно использовать неявные двух- или трехслойные конечно-разностные схемы второго порядка с весами, являющиеся абсолютно устойчивыми в диапазоне значений весового коэффициента  $0,5 \leq \sigma \leq 1,0$  и достаточно точными при относительной ширине полосы частот сигнала до 10 %. Оценивание гармонических параметров узкополосного сигнала можно осуществлять с помощью простейшей параметрической модели первого порядка (гармонической интерполяции дискретной функции на трех точках).

Главный недостаток спектральных моделей второго уровня (необходимость предварительного задания базовых частот) устранен в так называемом адаптивном методе комплексных амплитуд. Его идея состоит в том, что, по крайней мере, некоторые из этих частот выбираются не априорно, а непосредственно в процессе моделирования, исходя из расположения преобладающих спектральных компонент возбуждающего тока.

На протяжении счета производится непрерывный мониторинг спектра колебаний электронного потока с периодической корректировкой набора базовых частот. Если в течение нескольких периодов рабочего вида колебания в спектре возбуждающего тока регистрируется устойчивая компонента с частотой, достаточно удаленной от всех существующих базовых

частот, и амплитудой, превышающей некоторый порог, в рассмотрение вводится новая базовая частота. Мониторинг включает также удаление неиспользуемых базовых частот. Адаптивный метод комплексных амплитуд позволяет увеличить широкополосность спектральных моделей второго уровня до величин, типичных для метода мгновенных значений, с сохранением всех преимуществ квазигармонического подхода.

**В шестом разделе** приведены результаты исследования колебаний замкнутого электронного потока в скрещенных полях в статическом режиме магнетронной системы. Наряду с открытыми ранее экспериментально и исследованными аналитически собственными тангенциальными колебаниями электронного облака, обнаружены и изучены неизвестные ранее виды самогруппировки электронного потока, а именно, вторично-эмиссионные сгустки, конвективные облака и турбулентности во втулке.

Возникновение собственных тангенциальных колебаний электронной втулки возможно только при условии, что влияние других механизмов самогруппировки исключено. В вычислительных экспериментах такие колебательные процессы могут быть обнаружены только с помощью полноформатных моделей, поскольку этот вид колебаний основан на азимутальной периодичности облака с периодом  $2\pi$ . Однако даже после разработки таких моделей собственные колебания длительное время не обнаруживались. Причина состоит в том, что эти колебания развиваются в течение длительного времени (десятки и сотни циклотронных периодов) и в некоторых случаях имеют тенденцию к разрушению или перерождению в конвективные сгустки. При наличии даже незначительной вторичной эмиссии они подавляются механизмом вторично-эмиссионной группировки потока. Лишь в результате специально спланированных численных экспериментов собственные тангенциальные колебания выделены в «чистом» виде.

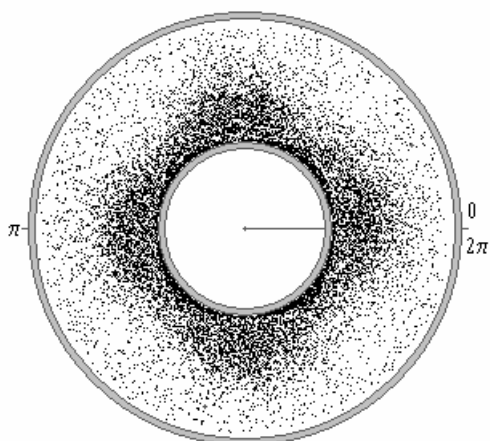


Рис. 3. Тангенциальная мода электронного облака

Внешний вид таких колебаний практически соответствует ранним теоретическим представлениям (рис. 3). Обычно наблюдаемое количество пространственных периодов составляет от трех до семи, в зависимости от геометрии системы, индукции магнитного поля и анодного напряжения. Вследствие азимутальной симметрии возмущенной втулки спектр шумов, наводимых тангенциальными модами на размещенный между катодом и анодом «зонд», доста-

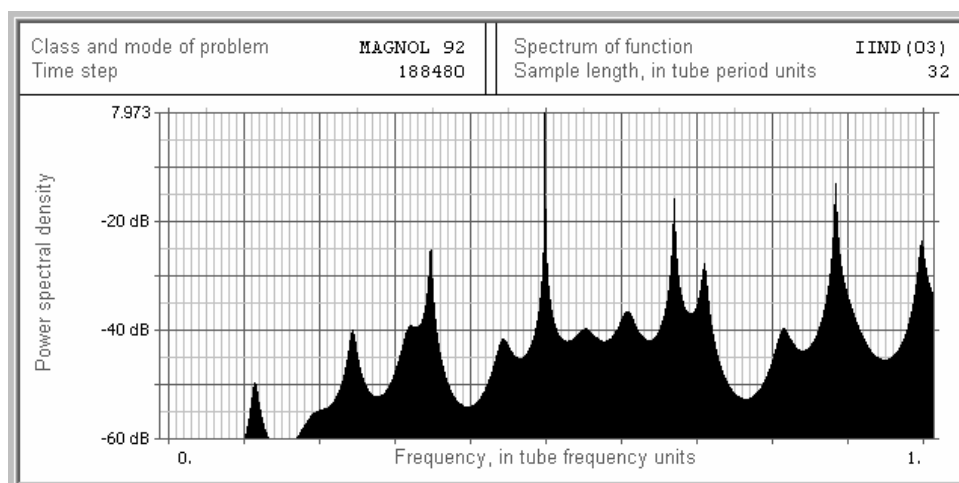


Рис. 4. Спектр собственных колебаний электронного облака

точно узкополосный (рис. 4). Он имеет четко выраженные пики на частотах, кратных частоте вращения электронного облака вокруг катода. Наибольшую амплитуду имеет гармоника с номером, равным числу пространственных периодов доминирующего вида колебания. Амплитуды соседних гармоник существенно меньше. Полученные в вычислительном эксперименте частоты гармоник собственных колебаний электронного облака с точностью до 10 ... 15 % совпадают как с экспериментальными данными, так и с аналитическими оценками. Вследствие своей «хрупкости», собственные колебания, по-видимому, не оказывают существенного влияния на качество выходного сигнала приборов М-типа.

Другим видом неустойчивости электронного потока вблизи распределенной эмиттирующей поверхности является его вторично-эмиссионная самогруппировка (рис. 5). Это явление было открыто автором в 1984 г. в численных экспериментах на полноформатных моделях и подтверждено В.Б.Байбуриным, А.В.Агафоновым и др. Первоначально ему был ошибочно приписан солитонный характер. В дальнейшем установлено отличие между этим видом неустойчивости и солитоноподобными конвективными облаками (рис. 6). Оно состоит в различной физической природе явлений (конвективные облака возникают и без вторичной эмиссии), внешнем виде и скорости возникновения (для вторично-эмиссионных сгустков – единицы циклотронных периодов, для конвективных облаков – десятки и сотни).

В основе вторично-эмиссионной группировки электронного облака лежит селективная вторично-эмиссионная подпитка неоднородного в азимутальном направлении электронного потока. Ускоренные вследствие кулоновского отталкивания электроны в передней части сгустка заворачиваются магнитным полем в направлении катода, осуществляя его усиленную

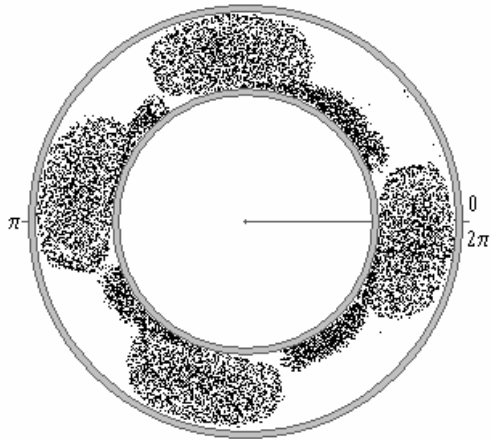


Рис. 5. Вторично-эмиссионные сгустки

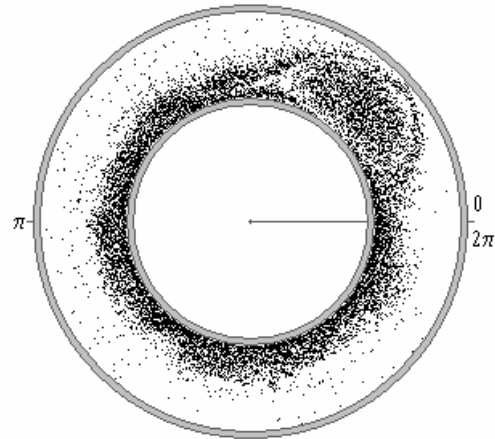


Рис. 6. Конвективное облако в электронной втулке

бомбардировку в данном месте. Эмиттированные здесь вторично-эмиссионные частицы подпитывают сгусток и вызывают его вращение вокруг собственной оси наподобие катящегося по катоду «водяного мешка». Обычно передние части вторично-эмиссионных сгустков касаются поверхности катода, а задние достаточно удалены от нее. Напротив, конвективное облако равномерно «приподнято» над поверхностью электрода, существуя как бы независимо от втулки и подавляя термоэлектронную эмиссию под собой. Подпитка его осуществляется через узкий канал, «обвивающий» вращающееся вокруг своей оси облако. Движение электронного потока на рис. 5 и 6 происходит по часовой стрелке.

Спектр вторично-эмиссионных группировок имеет хаотический характер с множеством флуктуирующих по частоте и амплитуде спектральных пиков. Спектр тока зонда при конвективной неустойчивости показан на рис. 7. В отличие от рис. 4, его особенностью является присутствие нескольких низших гармоник частоты вращения конвективного облака вокруг катода с примерно одинаковыми амплитудами. Сходство рис. 7 с экспериментально измеренными спектрами шумовых колебаний в магнетронных диодах может означать преобладание конвективных неустойчивостей втулки в скрещенных полях над ее собственными тангенциальными колебаниями. Конвективные облака могут быть основными переносчиками тока с катода на анод в сверхкритических режимах магнетронных диодов. Они возникают самопроизвольно, либо в результате перерождения тангенциальных колебаний или вторично-эмиссионных сгустков. Иногда наблюдается «расщепление» спектральных пиков тока зонда, свидетельствующее

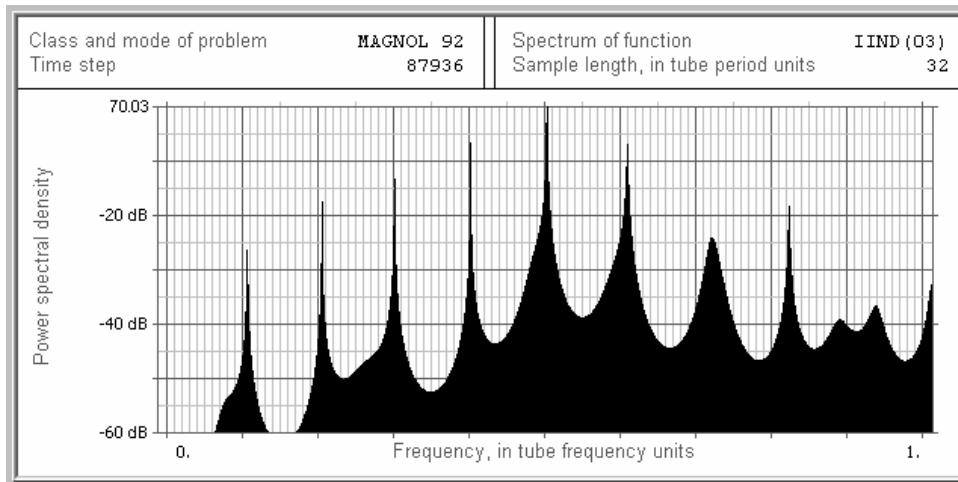


Рис. 7. Спектр тока зонда при конвективной неустойчивости

об одновременном существовании в потоке более одного вида колебаний, например, конвективного облака и тангенциального колебания.

Еще одним видом неустойчивости электронного потока в скрещенных полях является обнаруженная в вычислительных экспериментах турбулентность в период перехода втулки от двухпоточного к однопоточному состоянию. Такая турбулентность недолговечна и спустя несколько циклотронных периодов исчезает, уступая место другим видам колебаниям.

Спектры всех описанных неустойчивостей электронного потока содержат значительные гармонические составляющие в полосе пропускания ЭС, что приводит к генерации интенсивных шумов на выходе прибора. В то же время самогруппировка электронной втулки часто уменьшает длительность периода нарастания колебаний в автогенераторах со скрещенными полями.

Для подавления вторично-эмиссионной группировки необходимо, чтобы по крайней мере 20 ... 30 % эмиттированных из катода электронов имели термоэмиссионную природу, а если это невозможно (например, в системах с холодным вторично-эмиссионным катодом), следует, наоборот, максимально увеличивать коэффициент вторичной эмиссии. Избавиться от конвективной группировки таким способом не удастся, однако можно воспользоваться длительностью ее возникновения и подавить это колебание за счет более раннего возбуждения одного из нормальных видов ЭС.

Существенна оценка применимости моделей частиц к анализу шумов в СВЧ-приборах, поскольку традиционно считается, что этим моделям присущи значительные флуктуации. В результате статистической оценки дисперсии наведенного тока зонда по сравнению с конвекционным током вращающегося потока в различных режимах магнетронных диодов можно

сделать вывод, что при числе частиц порядка десятков тысяч для рассчитанных спектральных зависимостей достоверными являются гармоники с амплитудами, превышающими  $-30 \dots -35$  дБ (до  $-40$  дБ) от уровня наибольшей гармонической компоненты в спектре.

**Седьмой раздел** содержит описание временных и частотных характеристик колебаний электромагнитного поля и объемного заряда в динамическом режиме приборов М-типа. Особое внимание уделено нестационарным режимам при возбуждении нормальных мод ЭС, т.е. условиям, когда обычно происходит ухудшение формы спектра выходного сигнала и появление побочных составляющих. Обнаружены неизвестные ранее механизмы возникновения шумов при генерации колебаний в скрещенных полях. Изучение конкуренции мод в двухрядных усилителях М-типа позволило установить причины, ограничивающие коэффициент усиления этих приборов, и выработать рекомендации по их устранению.

Взаимодействие электронного потока с электромагнитным полем в приборах М-типа всесторонне исследовано с помощью одно- и многочастотных моделей. Поэтому в диссертации рассмотрены явления, которые могут быть корректно промоделированы лишь с использованием спектрального подхода. К ним относятся: эволюция спектра сигнала при переходных процессах; появление широкополосных (шумовых) составляющих в выходном спектре; конкуренция мод ЭС, частота по крайней мере одной из которых заранее не известна и т.п.

Исследования переходных процессов в магнетронных автогенераторах показывают, что здесь также имеют место три этапа, выделенные ранее автором применительно к усилителям М-типа обратной волны с распределенным катодом:

- предгенерационный этап, во время которого спицы объемного заряда еще не образовались;
- этап линейного взаимодействия, когда нелинейными эффектами можно пренебречь. В это время происходит формирование спиц;
- этап нелинейного взаимодействия, характеризующийся нарастанием нелинейности процессов в приборе из-за достижения спицами анода и постепенным установлением стационарного режима.

Предгенерационный этап является определяющим с точки зрения возбуждения колебаний в приборе. В начале его имеет место в основном самогруппировка втулки за счет процессов, описанных в предыдущем разделе. Этап заканчивается синхронизацией электронного потока полем одной из мод ЭС. Между периодом самогруппировки втулки и моментом ее синхронизации лежит период «подвозбуждения» полем ЭС собственного тангенциального колебания электронного облака, еще не синхронного с

нарастающей модой ЭС, но уже имеющего одинаковое с ней число пространственных периодов. В спектре выходного сигнала при этом присутствуют две близкие частоты: собственных колебаний втулки и возбуждаемой моды ЭС. Биения между ними вызывают пульсации мощности  $P_{out}$  и фазы  $\varphi_{out}$  выходного сигнала (рис. 8).

В магнетронах частота моды облака постепенно приближается к частоте моды ЭС, сливаясь с ней в момент синхронизации. В амплитронах, напротив, происходит мгновенный захват втулки полем ЭС. На рис. 8 этому моменту соответствует прекращение пульсаций и нарастание  $P_{out}$ .

Продолжительное сосуществование в приборах М-типа двух колебаний с отличающимися частотами вместо постепенного нарастания одного из них (синхронного), как считалось ранее, приводит к расширению спектра выходного сигнала на предгенерационном этапе по крайней мере на порядок по сравнению со значением, получаемым из оценки длительности нарастания амплитуды при переходном процессе.

Особенностью приборов М-типа с распределенным катодом является переход от предгенерационного состояния к генерирующему в узком интервале анодных напряжений, обычно смещенном относительно рабочего диапазона. Такой «жесткий» режим возбуждения вызван различием оптимальных условий синхронизма с полем рабочей моды ЭС формирующейся и сформировавшейся спиц. Поэтому при напряжениях, обеспечивающих нормальную работу прибора, возбуждение его затруднено. Напротив, при напряжениях, обеспечивающих возбуждение прибора, стационарный режим может не существовать.

Существенное влияние на спектр высокочастотных колебаний в те-

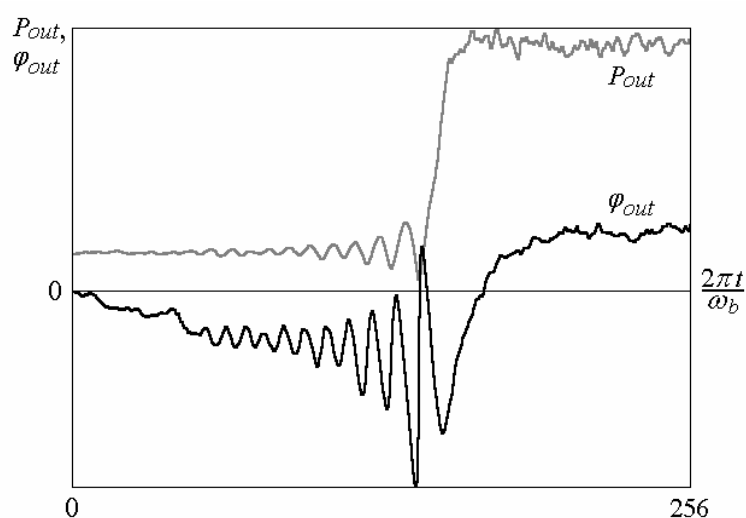


Рис. 8. Временные зависимости выходной мощности и фазы

чение переходного процесса при смене видов колебаний магнетронного генератора оказывает возникновение комбинационных составляющих от нелинейного взаимодействия обеих мод с электронным потоком. Промежуточная конфигурация электронного облака в переходном режиме создает множество временных гармоник возбуждающего тока с несоизме-

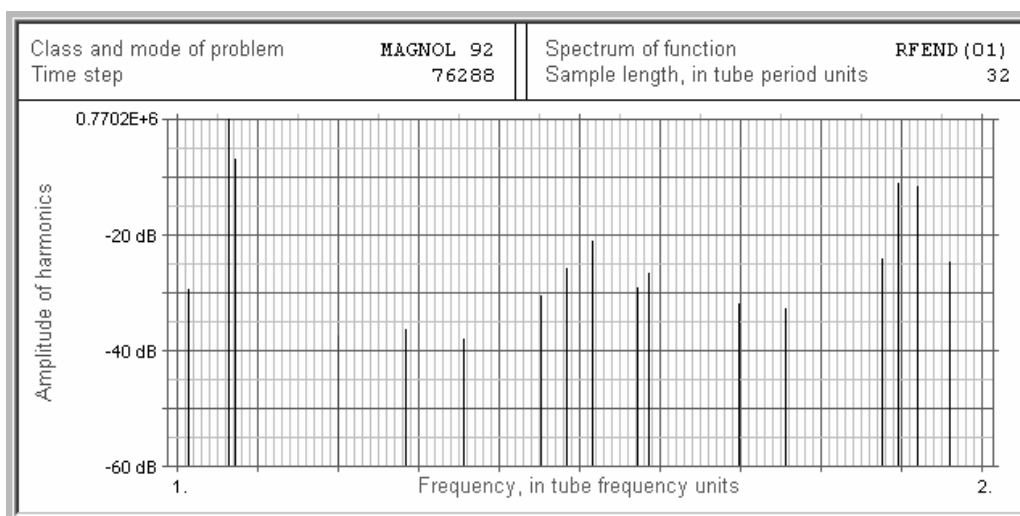


Рис. 9. Комбинационные составляющие в спектре выходного сигнала

римыми частотами. Спектр выходного сигнала в этот период показан на рис. 9. Видны две основные компоненты вблизи частот обеих нормальных мод ЭС ( $1,065f_{tube}$  и  $1,913f_{tube}$ ). Каждая из них представляет типичный при разложении квазигармонического сигнала методом Прони кластер гармоник, что соответствует расширению спектров мод. Кроме того, наблюдается обширная группа компонент в окрестности частоты  $1,5f_{tube}$ . Очевидны преимущества спектрального подхода перед многочастотным с точки зрения обнаружения заранее не прогнозируемых составляющих в спектре.

Причинами повышенного уровня шумов в динамическом режиме магнетронных приборов по сравнению с приборами О-типа могут быть турбулентные явления в электронных спицах, а также временные и пространственные флуктуации их границ. На рис. 10 показаны устойчивые

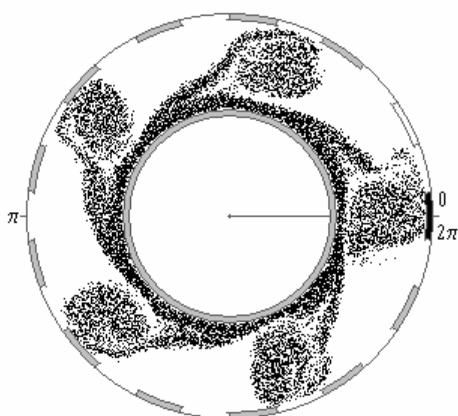


Рис. 10. Устойчивые конвективные облака в спицах

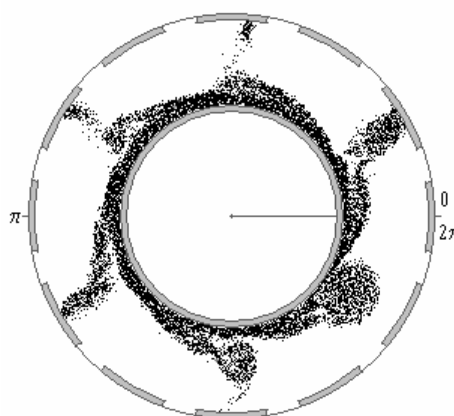


Рис. 11. Транзитные конвективные облака в спицах

конвективные облака, наблюдаемые в большинстве усилителей М-типа, а также в некоторых автогенераторах. Флуктуации формы и размера этих облаков увеличивают уровень шумов выходного сигнала. В области малых анодных токов, несмотря на азимутальную симметрию нормальных мод ЭС, часто происходит периодическое разрушение каналов тока с их последующим восстановлением путем перемещения транзитных конвективных облаков от втулки к аноду (рис. 11). Это вызывает азимутальную асимметрию и временные вариации формы облака объемного заряда, приводящие к «дрожанию» амплитуды и фазы ВЧ-поля и появлению боковых составляющих в спектре выходного сигнала (рис. 12). Описанные эффекты ослабевают или исчезают вблизи верхней границы диапазона анодных напряжений, что согласуется с экспериментально наблюдаемым уменьшением уровня шума выходного сигнала при больших анодных токах.

Вопросы подавления побочных колебаний и повышения коэффициента усиления усилителей М-типа могут решаться лишь в едином контексте. Однако корректный анализ, например, нелинейного взаимодействия рабочей и карматронной мод амплитрона до настоящего времени отсутствовал, поскольку он может быть выполнен лишь с помощью спектральных моделей. На рис. 13 показан выходной спектр амплитрона в режиме карматронного самовозбуждения при наличии на входе гармонического сигнала с мощностью, недостаточной для синхронизации электронного потока. Помимо входного сигнала и компоненты карматронной моды, в нем присутствует целая сетка примерно равноотстоящих по частоте комбинационных составляющих, обусловленных взаимодействием двух сигналов с близкими частотами – входного и генерируемого карматронным видом.

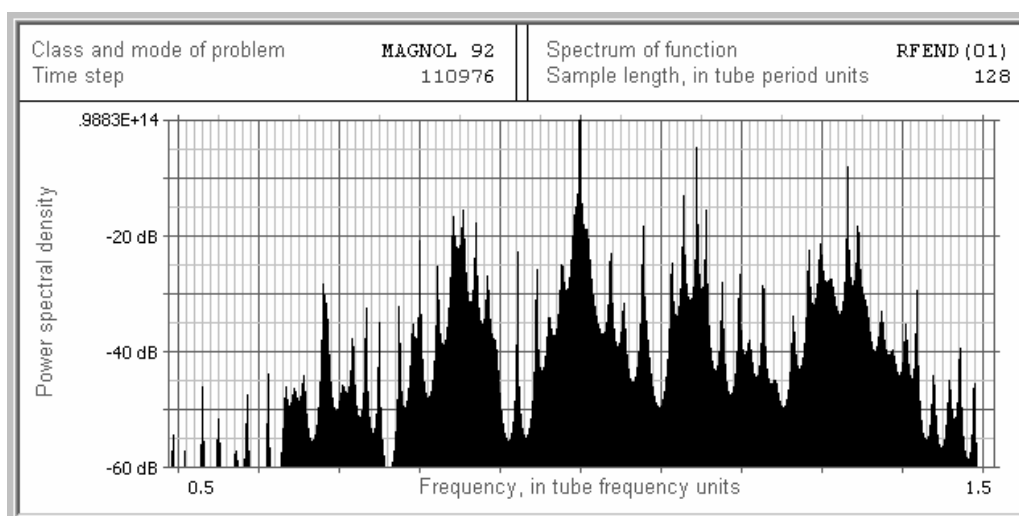


Рис. 12. Спектр магнетрона при наличии транзитных облаков

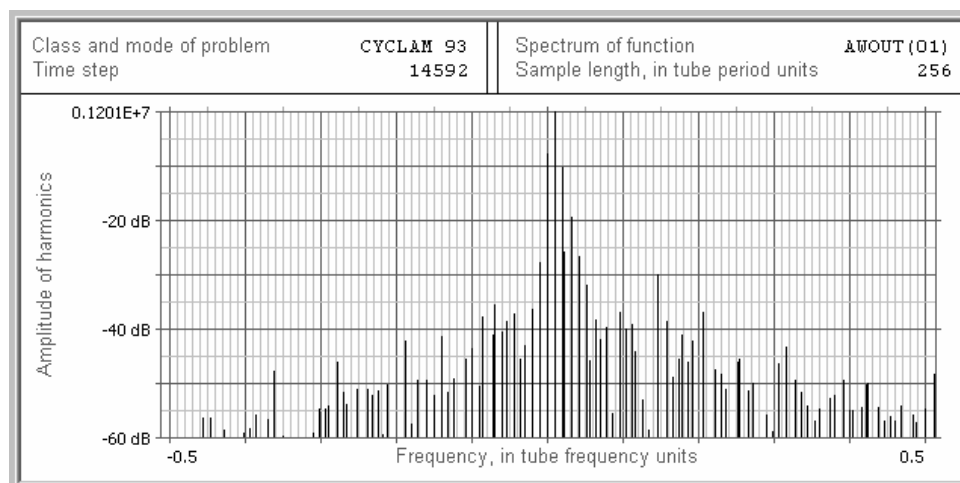


Рис. 13. Нелинейное взаимодействие рабочей и карматронной мод

Одним из способов повышения коэффициента усиления усилителей М-типа является использование двухрядных систем, содержащих катодную (КЭС) и анодную (АЭС) ЭС. Однако в экспериментах (А.И.Дегтярев, Г.Г.Козорезов) установлено, что реальное увеличение коэффициента усиления при катодном возбуждении весьма ограничено. Теоретические исследования показывают, что одной из причин является переход электронного потока под управление полем АЭС. Электронное облако – нелинейная система, перестраивающая свою конфигурацию в соответствии со структурой поля доминирующей в данном месте моды. Поскольку обе ЭС двухрядной системы расположены одна над другой, поле АЭС не убывает до нуля даже в области электронной втулки. Поэтому при больших коэффициентах усиления побочные моды АЭС переформируют электронный поток в соответствии со своей конфигурацией, прекращая тем самым его синхронизацию полем входного сигнала в КЭС.

Для повышения коэффициента усиления двухрядного усилителя предложено использовать одну или две торцевые области группировки, смещенные относительно области взаимодействия в аксиальном направлении [рис. 14 (а) и (б)]. В них присутствует КЭС и гладкий анод, что позволяет потоку сгруппироваться без помех со стороны поля АЭС. Сгруппированные сгустки дрейфуют за счет неоднородности магнитного поля в область взаимодействия, содержащую АЭС и гладкий катод, где наводят в АЭС волну, синхронную с полем сигнала в КЭС.

**В выводах** изложены основные научные и практические результаты, полученные в диссертации. Сформулированы рекомендации относительно их возможного применения. Предложены направления и перспективы

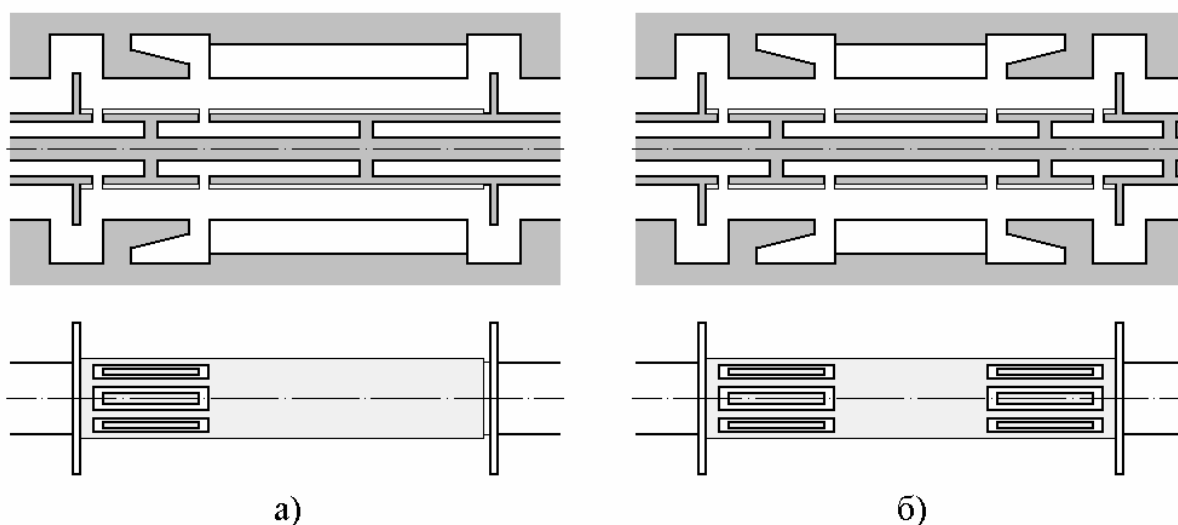


Рис. 14. Двухрядные системы с торцевыми областями группировки

дальнейшего развития спектрального подхода к теоретическому анализу нелинейных систем.

**В приложениях** приведены некоторые вспомогательные соотношения и оценки, не включенные в основную часть. Описаны архитектурные, алгоритмические, программные и интерфейсные особенности программной системы TULIPgm (TUbe modeLIng Program), предназначенной для нестационарного и спектрального моделирования приборов М-типа. С ее помощью получены численные результаты диссертационной работы.

## ВЫВОДЫ

В диссертационной работе приведено теоретическое обобщение и новое решение научной проблемы, заключающейся в обеспечении электромагнитной совместимости существующих и вновь разрабатываемых радиоэлектронных средств с другими электронными системами в условиях постоянно обостряющейся электромагнитной обстановки.

Для этого разработан спектральный подход к теоретическому анализу физических явлений в нелинейных колебательных системах, состоящих из ЭС и распределенного электронного потока. Проведенные с его помощью исследования позволили уточнить известные и сформировать новые физические концепции механизмов нелинейного взаимодействия потоков заряженных частиц с негармоническими электромагнитными полями в приборах М-типа. Фундаментальный характер таких исследований подтверждается выявлением неизвестных ранее явлений и закономерностей взаимодействия в скрещенных полях, позволяющим улучшить параметры,

расширить возможности и области применения этих приборов. Открыты и изучены физические процессы (в частности, неустойчивости и группировки электронного потока), которые не могли быть обнаружены в реальных экспериментах, но создающие повышенный уровень шумов и побочных колебаний в статическом и динамическом режимах приборов М-типа.

Прикладное значение исследований состоит в разработке единой методологии математического моделирования негармонических колебательных процессов, происходящих при нелинейном взаимодействии распределенных электронных потоков с электромагнитными полями. Данный подход может найти применение при изучении широкого класса подобных явлений в различных нелинейных системах с распределенными параметрами (например, на основе полупроводниковых сред). Понимание природы побочных колебаний в скрещенных полях дает возможность принять меры по уменьшению их отрицательного влияния на качество сигнала приборов М-типа.

Главные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработаны общие принципы и методология спектрального подхода к моделированию СВЧ-приборов. Дано определение спектральной модели. Сформулированы требования к нестационарным моделям, лежащим в основе спектрального подхода. Спектральные модели классифицированы с точки зрения методики расчета электромагнитного поля на несколько уровней. Это дает возможность при анализе спектров колебаний конкретных нелинейных систем правильно выбрать необходимый для каждого случая математический аппарат.

2. Разработана методическая и алгоритмическая база для спектрального анализа временных последовательностей физических величин, формируемых в процессе спектрального моделирования. Установлено, что среди параметрических методов спектрального и гармонического оценивания функций наиболее подходящими для этой цели являются ковариационные авторегрессионные методы и методы Прони. Выявлены причины недостаточно надежной работы опубликованных в литературе алгоритмов данных методов. Проведена адаптация этих алгоритмов к особенностям временных выборок, получаемых при нестационарном моделировании СВЧ-приборов.

3. Создан математический аппарат для построения спектральных моделей первого уровня. В них типичным является дискретное приближение ЭС, базирующееся на декомпозиции электромагнитного поля в нормальные или парциальные моды. Указанные моды связаны взаимными линейными преобразованиями функциональных пространств  $L^2$  с преобра-

зующей матрицей формы нормальных мод. Предложены три способа задания ГУ на входе и выходе ЭС конечной длины, возбуждаемой в режиме бегущей волны: имитация согласования, близкого к идеальному; моделирование реальных ввода и вывода энергии; имитация согласованной нагрузки.

4. Создан математический аппарат для построения спектральных моделей второго уровня. В них типичным является непрерывное приближение ЭС, базирующееся на декомпозиции электромагнитного поля в регулярные моды. Эти моды определяются как комплексные огибающие нормальных мод ЭС в продольном направлении. Вследствие своей непрерывности, регулярные моды аппроксимируют немонахроматическое поле ЭС в ограниченной полосе частот с большей точностью, чем парциальные. Выведено нестационарное уравнение для мгновенных значений регулярных мод.

5. Разработаны общие принципы построения спектральных моделей СВЧ-приборов, основанных на методе макрочастиц. Распределение зарядов частиц по узлам сети дискретизации и интерполяцию полей между узлами предложено осуществлять на четырехмерной пространственно-временной сети. Для этой цели создан специальный алгоритм, названный «полиномы со сглаживанием» (PWS). Предложен адаптивный метод комплексных амплитуд, основанный на динамическом выборе базовых частот в процессе моделирования, исходя из текущего спектра возбуждающего тока. Этот метод совмещает преимущества спектральных моделей первого уровня (широкополосность) с достоинствами моделей второго уровня (точность).

6. С помощью полноформатных моделей частиц выяснены условия возникновения собственных тангенциальных колебаний замкнутого облака объемного заряда в скрещенных полях. Изучена самогруппировка потока при наличии распределенного вторично-эмиссионного катода, подтверждены результаты теоретических работ, прогнозировавших возникновение конвективных и турбулентных неустойчивостей электронного потока в магнетронном диоде. Установлено различие в скорости развития колебательных процессов и спектрах наведенного тока для колебаний различной природы. Оценена степень влияния каждого из них на спектр электромагнитного поля в приборах М-типа. В частности, наиболее вероятной причиной автоколебаний в магнетронном диоде являются не тангенциальные неустойчивости замкнутого электронного потока в скрещенных полях, как считалось ранее, а конвективные облака.

7. Показано, что развитые ранее автором представления о трех этапах переходного процесса при возбуждении колебаний в магнетронных

усилительных системах обратной волны с распределенной эмиссией (пред-генерационный, линейного и нелинейного взаимодействия) могут быть обобщены также на магнетронные автогенераторы. Обнаружено, что между периодом самогруппировки втулки (например, за счет ее собственных тангенциальных колебаний), с одной стороны, и периодом ее синхронизации полем рабочей нормальной моды ЭС – с другой, лежит период «подвозбуждения» собственного колебания электронного облака полем электродинамической системы. В результате расширение спектра выходного сигнала на первом этапе переходного процесса примерно на порядок превышает значения, вытекающие из оценки времени нарастания колебаний, поскольку в нем присутствуют две частоты: частота собственных колебаний втулки и частота возбуждаемой нормальной моды ЭС.

8. Вследствие различия потенциалов синхронизма с замедленной электромагнитной волной для электронов, движущихся на внешней границе втулки, с одной стороны, и вблизи анода – с другой, диапазоны напряжений, при которых возбуждается и существует каждый нормальный вид колебаний ЭС, перекрываются лишь частично. Это является физической причиной известного на практике «жесткого» режима возбуждения приборов М-типа, для которых существенно влияние объемного заряда, т.е. электронного гистерезиса.

9. В течение переходного процесса, имеющего место при изменении рабочего нормального вида колебаний ЭС магнетронного автогенератора, электронный поток в приборе приобретает сложную конфигурацию, созданную одновременным воздействием на него электромагнитных полей затухающей и нарастающей нормальных мод ЭС, амплитуды которых сравнимы по величине. В результате спектр выходного сигнала обогащается многочисленными комбинационными и интермодуляционными составляющими, расположенными в существенно более широкой полосе частот, чем диапазон между вышеуказанными нормальными модами ЭС.

10. Среди причин повышенного уровня шумов выходного сигнала в динамическом режиме приборов М-типа значительную роль играют турбулентные явления в электронных спицах. Устойчивые конвективные облака на вершинах спиц подвержены флуктуациям формы и размеров, что изменяет во времени случайным образом плотность возбуждающего конвекционного тока. Вблизи нижней границы области рабочих анодных напряжений наблюдаются существенные временные флуктуации формы всего электронного облака за счет периодического отрыва от втулки и подъема к аноду транзитных конвективных облаков. Для уменьшения данных явлений следует по возможности выбирать режим работы прибора, при котором ток катода ограничивается его эмиссионной способностью.

11. Несмотря на то, что спектр колебаний при самовозбуждении усилителей обратной волны М-типа с замкнутым электронным потоком на карматронном виде является достаточно узкополосным, при наличии внешнего сигнала с мощностью, недостаточной для подавления этого вида, на выходе прибора появляется широкая «сетка» комбинационных составляющих, обусловленных нелинейным взаимодействием двух волн в ЭС: созданной входным сигналом и возбуждаемой электронным потоком.

12. Среди причин, ограничивающих коэффициент усиления двухрядных усилителей обратной волны с замкнутым электронным потоком, существенную роль играет преимущественное воздействие на электронное облако ВЧ-поля анодной ЭС, что создает благоприятные условия для возбуждения различных паразитных видов колебаний. В целях подавления этих видов и повышения коэффициента усиления указанных приборов предложено использовать одну или две торцевые области группировки, в которых присутствует только катодная ЭС, а анод выполнен гладким. Это позволяет электронному потоку беспрепятственно сгруппироваться под действием поля входного сигнала. Сгруппированные сгустки дрейфуют затем в область взаимодействия, где наводят в анодной ЭС составляющую электромагнитного поля, синхронную по частоте с входным сигналом.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Грицунов А.В. Пакет прикладных программ для моделирования СВЧ-усилителей со скрещенными полями // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 1985. – Вып. 72. – С. 23-31.

2. Грицунов А.В. Об использовании квазипериодического приближения при численном моделировании усилителей М-типа // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 1985. – Вып. 73. – С. 119-126.

3. Грицунов А.В., Галаган А.В. Об использовании уравнения возбуждения второго порядка при моделировании автогенераторов со скрещенными полями // Радиотехника и электроника. – 1989. – Т. 34. – № 8. – С. 1719-1722.

4. Галаган А.В., Грицунов А.В., Писаренко В.М. К вопросу решения уравнения возбуждения в моделях «крупных» частиц // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 1989. – Вып. 90. – С. 123-126.

5. Churyumov G.I., Gerasimov V.P., Gritsunov A.V., Zakorin V.A. Prospects of Applying a Computational Experiment to the Concept and the Use of Crossed-Field Devices // Telecomm. and Radio Engineering. – 1998. – V. 52. – No. 12. – P. 39-48.

6. Васянович А.В., Грицунов А.В., Фролова Т.И., Чурюмов Г.И. Не-

стационарные процессы в приборах М-типа // Радиоэлектроника и информатика. – 2001. – № 1. – С. 38-41.

7. Грицунов А.В. Об автоматизации определения коэффициента кратности макрочастиц // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2001. – Вып. 118. – С. 102-104.

8. Грицунов А.В. О сглаживании выходных параметров нестационарных моделей // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2001. – Вып. 120. – С. 119-122.

9. Gritsunov A.V. On Spectral Modeling of Microwave Devices // Telecomm. and Radio Engineering. – 2001. – Vol. 55. – No. 8. – P. 98-102.

10. Грицунов А.В. К выводу уравнения возбуждения цепочки связанных резонаторов для метода мгновенных значений // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2001. – Вып. 121. – С. 156-162.

11. Грицунов А.В. К выводу уравнения возбуждения периодической замедляющей системы для метода комплексных амплитуд // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2001. – Вып. 122. – С. 169-178.

12. Грицунов А.В. К расчету коэффициентов матричного уравнения возбуждения резонаторной замедляющей системы // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 124. – С. 16-23.

13. Грицунов А.В. К решению матричного уравнения возбуждения резонаторной замедляющей системы // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 125. – С. 101-105.

14. Грицунов А.В. К интегрированию уравнения возбуждения замедляющей системы для метода мгновенных значений // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 127. – С. 89-94.

15. Герасимов В.П., Грицунов А.В., Писаренко В.М. К моделированию граничных условий в цепочке связанных резонаторов для метода мгновенных значений // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 129. – С. 119-126.

16. Грицунов А.В., Чурюмов Г.И. К моделированию прохождения радиоимпульса через нелинейную структуру медленной волны // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 130. – С. 60-67.

17. Васянович А.В., Грицунов О.В., Копоть М.А., Мутовіна Н.В., Фролова Т.І. Моделювання динаміки часток в нестационарних моделях приладів зі схрещеними полями // Теоретична електротехніка. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка. – 2002. – Вип. 56. – С. 54-59.

18. Грицунов А.В., Копоть М.А., Лебедев О.Г., Фролова Т.И. О реализации метода Прони для слабо зашумленных выборок // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 4. – С. 27-32.

19. Gritsunov A.V., Turenko L.Y. Harmonic Decomposition of an Excit-

ing Current in Simulation of the Electron Devices // *Telecomm. and Radio Engineering*. – 2002. – V. 58. – No. 11–12. – P. 56-67.

20. Грицунов А.В. Выбор методов спектрального оценивания временных функций при моделировании СВЧ-приборов // *Радиотехника*. – 2003. – № 9. – С. 25-30.

21. Vasyanovich A.V., Gritsunov A.V., Nikitenko A.N., Horunzhii M.O. General Principles of Spectral Modeling of Microwave Devices // *Telecomm. and Radio Engineering*. – 2003. – V. 60. – No. 1–2. – P. 88-99.

22. Васянович А.В., Грицунов А.В., Никитенко А.Н. К оценке погрешностей предположений, лежащих в основе спектральных моделей первого уровня // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2003. – Вып. 132. – С. 60-64.

23. Грицунов А.В. О спектральном подходе к моделированию СВЧ-приборов // *Радиотехника и электроника*. – 2004. – Т. 49. – № 7. – С. 882-885.

24. Грицунов А.В. Возбуждение нестационарных немонохроматических полей в направляющих электродинамических системах. Часть I. Дискретное приближение // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2004. – Т. 3. – № 2. – С. 64-70.

25. Грицунов А.В. Возбуждение нестационарных немонохроматических полей в направляющих электродинамических системах. Часть II. Непрерывное приближение // *Прикладная радиоэлектроника*. – 2004. – Т. 3. – № 3. – С. 67-72.

26. Gritsunov A.V. Mechanisms of an Electron Stream Self-Bunching in Magnetron Guns // *Вопросы атомной науки и техники. Ядерно-физ. исследования*. – 2004. – № 2. – С. 150-152.

27. Gritsunov A.V. An Adaptive Method of Complex Amplitudes in Spectral Simulations of the Electron Devices // *Telecomm. and Radio Engineering*. – 2004. – V. 61. – No. 7. – P. 623-631.

28. Чурюмов Г.И., Фролова Т.И., Грицунов А.В., Исаева Е.Б. Анализ частотных характеристик двухкаскадного магнетронного автогенератора // *Вісник Сумського державного університету. Сер. Фізика, математика, механіка*. – 2004. – № 10(69). – С. 249-254.

29. Грицунов А.В., Козорезов Г.Г., Копоть М.А. О повышении коэффициента усиления двухрядных усилителей со скрещенными полями // *Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2005. – Вып. 140. – С. 82-85.

30. Васянович А.В., Грицунов А.В., Лебедев О.Г., Чурюмов Г.И. Эволюция спектров сигналов при переходных процессах в генераторах и усилителях М-типа // *Радиоэлектроника и информатика*. – 2005. – № 1. – С. 22-28.

31. Грицунов А.В. О колебаниях замкнутого электронного потока в скрещенных полях // Радиоэлектроника и информатика. – 2005. – № 2. – С. 7-15.
32. А.с. 260210 СССР, МКИ H01J 25/50. / А.В.Грицунов, Г.Г.Козорезов (СССР). – № 3133077; Заявлено 23.01.1986; Зарег. 01.09.1987.
33. А.с. 1802646 СССР, МКИ H01J 25/50. Обращенный усилитель магнетронного типа с катодным возбуждением / Г.И.Чурюмов, А.В.Васянович, А.В.Грицунов, Г.Г.Козорезов (СССР). – № 4837175; Заявлено 11.06.1990; Опубл. 15.03.1993, Бюл. № 10. – 3 с.
34. Деклараційний патент 47632 А України, МПК H01J 25/50. Магнетрон / М.А.Копоть, Г.І.Чурюмов, Г.Г.Козорезов, О.В.Грицунов (Україна). – № 2001053685; Заявлено 31.05.2001; Опубл. 15.07.2002, Бюл. № 7. – 2 с.
35. Деклараційний патент 58753 А України, МПК H01J 25/50. Магнетрон / М.А.Копоть, Г.І.Чурюмов, Г.Г.Козорезов, О.В.Грицунов (Україна). – № 2002107945; Заявлено 07.10.2002; Опубл. 15.08.2003, Бюл. № 8. – 2 с.
36. Деклараційний патент 65216 А України, МПК H01J 25/50. Коаксіальний магнетрон / М.А.Копоть, О.В.Грицунов (Україна). – № 2003065613; Заявлено 18.06.2003; Опубл. 15.03.2004, Бюл. № 3. – 2 с.
37. Грицунов А.В. Адаптивный метод комплексных амплитуд в спектральных моделях СВЧ-приборов // Материалы 11-й международной конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2001). – Севастополь: «Вебер». – 2001. – С. 224-227.
38. Gritsunov A.V. Evaluation of Vortex Fields in a Non-Linear Slow-Wave Structure. I. The Method of Instantaneous Values // Proc. Third IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2002) – Monterey, CA. – 2002. – P. 143-144.
39. Gritsunov A.V. Evaluation of Vortex Fields in a Non-Linear Slow-Wave Structure. II. The Method of Complex Amplitudes // Proc. Third IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2002) – Monterey, CA. – 2002. – P. 145-146.
40. Gritsunov A.V. The Spectral and Harmonic Analysis in Microwave Electronics // Proc. XIV Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON-2002). – Vol. 1. – Gdansk. – 2002. – P. 73-76.
41. Gritsunov A.V. The Spectral Approach to Solving of EMC Problems at Microwave Tubes Simulation // Proc. 16th Int. Wroclaw Symp. and Exhibition on Electromagnetic Compatibility. – Vol. 1. – Wroclaw. – 2002. – P. 139-144.
42. Gritsunov A.V., Nikitenko O.M. Probable Sources of a Noise in Crossed-Field Devices. I. Non-Generating Tubes // Proc. Fourth IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2003) – Seoul. – 2003. – P. 246-247.
43. Gritsunov A.V., Nikitenko O.M. Probable Sources of a Noise in Crossed-Field Devices. II. Generating Tubes // Proc. Fourth IEEE Int. Vacuum

Electronics Conf. (IVEC 2003) – Seoul. – 2003. – P. 248-249.

44. Gritsunov A.V. Non-Monochromatic Fields in a Dispersive Electrodynamical Line. I. The Discrete Approximation // Proc. Fifth IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2004) – Monterey, CA. – 2004. – P. 220-221.

45. Gritsunov A.V. Non-Monochromatic Fields in a Dispersive Electrodynamical Line. II. The Continuous Approximation // Proc. Fifth IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2004) – Monterey, CA. – 2004. – P. 222-223.

46. Churyumov G.I., Frolova T.I., Gritsunov A.V., Nikitenko O.M., Zin'kovsky V.N. The Magnetrons – Electromagnetic Interference (EMI) Sources: Computer Modeling and Experimental Investigations // Proc. Int. Symp. on Electromagnetics Compatibility (EMC EUROPE 2004) – Eindhoven. – 2004. – P. 327-331.

## АНОТАЦІЯ

**Грицунов О.В. Збудження електромагнітних коливань довільного спектрального складу замкненими електронними потоками в системах зі схрещеними полями. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України, Харків, 2005.

В дисертації досліджено частотні характеристики негармонійних коливань, що виникають при взаємодії сповільнених електромагнітних хвиль з замкненими розподіленими електронними потоками в схрещених полях. Розвивається новий напрям в фізичній електроніці – спектральне моделювання НВЧ-приладів, що містять електродинамічні системи та електронні потоки. Розроблено спектральні моделі таких приладів на основі методу миттєвих значень та комплексних амплітуд. Теоретичним шляхом одержано та проаналізовано спектри побічних і шумових коливань в приладах М-типу з розподіленим катодом. Встановлено причини підвищеного рівня шумів в статичному та динамічному режимах магнетронних систем і розглянуто можливі заходи по їх зниженню. Запропоновано рішення, що дозволяють підвищити коефіцієнт посилення підсилювачів М-типу.

**Ключові слова:** нелінійна система, перехідний процес, спектр, схрещені поля, частотний континуум, чисельне моделювання.

## АННОТАЦИЯ

**Грицунов А.В. Возбуждение электромагнитных колебаний произвольного спектрального состава замкнутыми электронными потоками в системах со скрещенными полями. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника. – Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины, Харьков, 2005.

В диссертации исследованы частотные характеристики негармонических колебаний, возникающих при взаимодействии замедленных электромагнитных волн с замкнутыми распределенными электронными потоками в скрещенных полях. Развивается новое направление в физической электронике – спектральное моделирование СВЧ-приборов, содержащих электродинамические системы и электронные потоки. Разработаны спектральные модели таких приборов на основе метода мгновенных значений и комплексных амплитуд. Теоретическим путем получены и проанализированы спектры побочных и шумовых колебаний в приборах М-типа с распределенным катодом. Установлены причины повышенного уровня шумов в статическом и динамическом режимах магнетронных систем и рассмотрены возможные меры по их снижению. Предложены решения, позволяющие повысить коэффициент усиления усилителей М-типа.

**Ключевые слова:** нелинейная система, переходный процесс, спектр, скрещенные поля, частотный континуум, численное моделирование.

## ABSTRACT

**Gritsunov A.V. Excitation of electromagnetic oscillations of arbitrary spectral contents by re-entrant electron beams in crossed-field systems. – Manuscript.**

Thesis for a doctor's degree by speciality 01.04.04 – physical electronics. – A.Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine, 2005.

The dissertation contains investigation of frequency characteristics of oscillations taking a place while an interaction of an electron beam with electromagnetic waves in crossed fields. A described approach for “delay structure and electron beam” non-linear systems simulation, which may be named as spectral, is a new evolution branch of the theoretical analysis methods in the physical electronics. Its principal feature is analysis of the electron-wave interaction phenomena in a wide frequency continuum (up to the delay line passband or even several passbands of one).

The spectral approach is realized at the base of a non-stationary simulation technique. The spectrum of an input signal is transformed into the time domain and is used as a boundary condition of a transient model. The output signal, as well as other tube parameters, is transferred back into the frequency domain. Three levels of the spectral models are defined with a different methodol-

ogy concerning calculation of the solenoidal RF fields. The second-order and the first-order excitation equations are derived taking into account the frequency dependencies of the RF field structures along with the electrodynamic parameters of the delay lines in concerned frequency band. The procedures for evaluation of the electrodynamic coefficients of the delay lines and algorithms of integration of the excitation equations are considered, including multistep fourth-order Adams-Bashforth method and implicit second-order finite-difference schemes. An adaptive method of complex amplitudes is proposed for increasing of the second-level model broadbandness. The feasible procedures of spectral and harmonic estimation of output parameter time series, which are obtained while the spectral simulation of microwave devices, are chosen.

Various oscillations of a re-entrant electron beam in crossed fields nearby distributed emitting surface in the static state of the M-type devices are investigated. This is the natural oscillations of the cloud, the secondary-emission bunches, the convective clouds and the turbulences of the electron hub. Influences of these oscillations on the output signal spectra in the crossed-field devices are estimated. It is shown that the secondary-emission bunches are concerned with a non-uniform secondary-emission feeding of heterogeneous in azimuthal direction electron beam.

Time evolution of the re-entrant electron beam in crossed fields in the dynamic state of the M-type devices is explored. Three phases of a transient process during the system swinging are considered in details. A subexcitation of the natural mode of a re-entrant electron beam by the delay line RF field during the tubes starting is ascertained, that produces two harmonics with slightly different frequencies at the tube output.

Because of different synchronism conditions for the electrons at the hub outer bound and at the spokes tops, only partial overlapping of the anode voltage ranges for the magnetron system operating mode rising, on the one hand, and for the steady state, on the other one, is detected. It results in the low- and the middle-power systems current-voltage diagram hysteresis. Significant pulsations of the output signal amplitude and phase occur during the magnetron system turn-on transient. They cause the signal spectrum widening, at least by order of magnitude greater than the evaluated from the transient process duration one.

The negative influence of misfires on the magnetron output signal spectrum is confirmed, because of powerful noise pulses short-time generation at these moments. The spectral density peaks of ones are situated around the delay line normal modes eigenfrequencies.

Carmatron-like excitation of backward-wave amplifying system is investigated. If an input signal is present, but its power is not enough for the system synchronization, a non-linear interaction between the both harmonic waves with

nearby frequencies (generated by the electron beam and created by the input signal) occurs. As a result, whole lattice of equidistant intermodulation components is present at the output endpoint of the delay line, which causes the EMI.

Among the causes of the M-type devices output signal enlarged noise level, convection phenomena in the electron spokes are present. Rotating soliton-like clouds in spoke tops change in size that causes temporary fluctuations of the induced current. The spoke shape fluctuations are observed also, if the system operates nearby the low bound of the anode voltages work range. They result in the output signal jitter and the output spectrum broadening.

The actions for the noise and spurious oscillation levels reduction are described. The ways for increase of the magnetron system gain and extension of the operating anode voltage range are proposed. These are applications of one or two axially shifted bunching spaces nearby the interaction space axial endpoints, which contain only the cathode delay line. Bunched in these spaces electron clouds drift into the interaction space. Thus, a condition for the electron beam bunching under the input signal influence without a disturbance from the anode delay structure RF field is ensured.

**Key words:** non-linear system, transient process, spectrum, crossed fields, frequency continuum, numerical simulation.

Подп. в печать 10.03.06.      Формат 60x84 1/16.      Способ печати – ризография.  
Усл. печ. листов 2,0.      Цена договорная.      Тираж 100 экз.  
Зак. №

---

ХНУРЭ, 14, пр. Ленина, Харьков, 61166

---

Напечатано в учебно-научном  
издательско-полиграфическом центре ХНУРЭ  
14, пр. Ленина, Харьков