

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396.6

СЕНЬКО
Александр Васильевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ГИРОРЕЗОНАНСНЫХ
УСИЛИТЕЛЯХ, ГЕНЕРАТОРАХ И ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ
ЭЛЕКТРОНОВ НА НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДАХ С УЧЕТОМ
ОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СТЕНКАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Минск 2012

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель Колосов Станислав Васильевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры вычислительных методов и программирования учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: Тихомиров Виктор Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией ядерной оптики и космофизики НИИ Ядерных Проблем

Кижлай Игорь Николаевич, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер кафедры «Антенн и устройств СВЧ» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация: Белорусский государственный университет

Защита состоится 14 марта 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.05 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп.1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293- 89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Требования обеспечения национальной безопасности Республики Беларусь связаны с задачами повышения оборонного потенциала и создания новых средств ПВО и ПРО. В связи с этим усиливается научный интерес к разработке новых высокоэффективных усилителей и генераторов СВЧ сантиметрового и особенно миллиметрового диапазонов, которые позволяют создавать радиотехнические комплексы, обеспечивающие эффективную защиту от воздушно-космического нападения. Кроме того, в национальной экономике мощные сверхвысокочастотные приборы позволяют решать инновационные задачи социально-экономического развития страны, связанные с получением новых материалов и созданием установок термоядерного синтеза и исследовательских ускорителей заряженных частиц, в основе которых используются мощные СВЧ-приборы.

Разработанные к настоящему времени комплексы программ моделирования процессов в приборах СВЧ, такие как Mafia, Karat, Magic, Christine и др. позволяют решать большинство практических задач. В них реализуется алгоритм конечно-разностного интегрирования уравнений Максвелла при заданных граничных условиях, но эти программы требуют весьма трудоемких вычислений, сходимость решения не всегда гарантирована и возникают трудности при задании граничных условий на входном и выходном сечениях нерегулярного волновода, что может приводить к неверным результатам моделирования. Однако остается недостаточно исследованной и математически разработанной задача построения математических моделей электровакуумных сверхвысокочастотных приборов на основе продольно-нерегулярных волноводов, учитывающих омические потери в стенках и позволяющих использовать эффективные алгоритмы оптимизации. Поэтому в диссертационной работе ставится задача создания такой модели, построенной на основе метода преобразования координат и проекционного метода Бубнова – Галёркина, которая позволит свести трехмерную краевую задачу к одномерной, что приведет к существенному сокращению времени расчета и повышению точности вычислений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертация выполнена в рамках одного из основных научных направлений учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» – «Методы моделирования и оптимизации радиоэлектронных систем и устройств».

Тема диссертации соответствует приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь раздел 12.11. «Физические и математические методы и их применение для решения актуальных проблем естествознания, техники, новых технологий, экономики и социальных наук» (согласно «Перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011 – 2015 годы», Постановление Совета Министров Республики Беларусь № 585 от 19 апреля 2010 года).

Результаты работы были использованы при выполнении научных проектов по следующим заданиям Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований:

- НИР № Ф08Р-050 «Нелинейные колебательные явления диапазона сверхвысоких частот в релятивистских пучках заряженных частиц, взаимодействующих с электромагнитными полями электродинамических систем» (№ ГР 20081650);

- НИР № Ф10Р-016 «Физическая и математическая оптимизация процессов взаимодействия релятивистских электронных потоков со сверхвысокочастотными электромагнитными полями» (№ ГР 20103017);

- НИР № Ф12Р-014 «Оптимизация нелинейных процессов в современных лазерах на свободных электронах и виркаторах на основе устойчивых и сходящихся алгоритмов» (№ ГР 2012-2712).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является получение новых математических моделей физических процессов в электровакуумных приборах СВЧ на основе нерегулярных волноводов с учетом омических потерь в стенках и выполнение с их помощью численного исследования и оптимизации параметров гирорезонансных усилителей, генераторов и линейных ускорителей электронов.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработать математическую модель гирорезонансных усилителей и генераторов, а также линейных ускорителей заряженных частиц на случай учета сложной геометрии пространства взаимодействия и наличия омических потерь в стенках волновода;

- реализовать разработанную математическую модель в виде компьютерной программы;

- выполнить с помощью разработанной программы компьютерного моделирования и оптимизации параметров гиротронов на модах шепчущей галереи, перестраиваемых гиротронов на отражающих фильтрах, гиро-ЛБВ с высоким коэффициентом усиления, гиротронов на гофрированном резонаторе, линейного ускорителя электронов на нерегулярном гофрированном волноводе, сверхпроводящей девятирезонаторной секции линейного коллайдера.

Объектом исследования являются физические процессы взаимодействия релятивистских электронных потоков с электромагнитными полями продольно-нерегулярных электродинамических структур с учетом омических потерь в стенках. *Предметом исследования* являются электровакуумные сверхвысокочастотные приборы.

Положения, выносимые на защиту

1. Развитие математической модели взаимодействия заряженных частиц с электромагнитными полями в электровакуумных СВЧ-приборах на случай учета омических потерь в стенках волновода, ее программная реализация в комплексе КЕДР (подсистема GYRO-K), что позволило существенно ускорить процесс моделирования по сравнению с моделями, основанными на сеточных методах, за счет сведения трехмерной краевой задачи к одномерной, а также более полно описать физические процессы в СВЧ-приборах с реальными электродинамическими структурами с омическими потерями.

2. Оптимальный профиль волновода для миллиметрового двухволнового гиротрона, обеспечивающий повышение электронного КПД с 40 до 45 % за счет нарастания амплитуд возбуждаемых мод от первой резонансной секции ко второй, что приводит к улучшению азимутальной группировки электронного пучка и соответственно к повышению КПД.

3. Теоретическое предсказание возможности создания гиро-ЛБВ с высоким коэффициентом усиления (более 62 дБ), с электронным КПД 38 % и полосою усиления 5,7 %, за счет введения в средней части лампы вставки с поглощающим электромагнитную энергию покрытием.

4. Обоснование возможности создания нового типа электронного прибора – гиротона на гофрированном резонаторе, в котором не происходит пространственной группировки электронного потока, однако за счет конгруэнтно-

сти электронного потока во времени возможно достижение высокого коэффициента преобразования мощности релятивистского электронного потока в мощность электромагнитной вращающейся E_{11} -волны с КПД более 80 % и мощностью $\sim 4,8$ МВт.

5. Расчет распределения амплитуд напряженности электрических полей для основной π -моды и ближайших к ней паразитных мод в 9-секционном сверхпроводящем ниобиевом резонаторе линейного ускорителя электронов и установление факта, что ближайшая паразитная мода отстоит на 728 кГц от основной при рабочей частоте 1,3 ГГц.

Личный вклад соискателя

Личный вклад соискателя заключается в получении метрического тензора для граничных условий на поверхности нерегулярного волновода с учетом омических потерь, написании программного модуля, определяющего профиль нерегулярного волновода и первые две производные от него, проведении оптимизационных расчетов по определению эффективных конструкций двухволнового гиротрона, гиро-ЛБВ с высоким коэффициентом усиления, гиротона с вращающейся несимметричной E -волной и ускорительной секции линейного ускорителя заряженных частиц, проведении анализа полученных результатов и формулировке основных выводов по работе.

Вклад научного руководителя доктора физико-математических наук, профессора С.В. Колосова заключался в постановке общей задачи диссертации, частных задач, помощи в разработке математических моделей, разработке программного обеспечения, формулировке выводов по результатам численного моделирования.

Вклад соавторов опубликованных научных работ состоял в помощи при разработке программного обеспечения, при выводе уравнений модели и физической интерпретации полученных результатов.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2008, 2009, 2010, 2011, 2012; Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо, Севастополь), 2007, 2009, 2010, 2011, 2012; 46-я научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР, 2010.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований, проведенных в диссертационной работе, опубликовано 18 печатных работ общим объемом 4 авторских листа, в том числе 6 статей в реферируемых научных журналах, 12 докладов в сборниках материалов научно-технических конференций, 1 отчет по НИР.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, семи глав, заключения, библиографического списка. В *первой главе* проведен анализ литературных источников, посвященных вопросам создания математических моделей электровакуумных приборов СВЧ, и формулируется задача диссертации. *Вторая глава* посвящена разработке математической модели электровакуумных сверхвысокочастотных приборов на основе продольно-нерегулярных волноводов с учетом омических потерь в стенках. В *третьей главе* производится выбор численных методов решения системы дифференциальных уравнений возбуждения и численной оптимизации параметров прибора. В *четвертой главе* описываются результаты моделирования и оптимизации физических процессов в гиротронах. В *пятой главе* приведены результаты моделирования и оптимизация физических процессов в гиро-ЛБВ. В *шестой главе* рассмотрены результаты моделирования и оптимизация физических процессов в гиротронах. В *седьмой главе* приведены результаты исследования и оптимизации физических процессов в линейных ускорителях.

Общий объем диссертации составляет 123 страниц, из них 100 страниц основного текста, 66 рисунков на 10 страниц, 3 таблицы на 1 странице, библиографический список из 91 наименования на 9 страницах, список собственных публикаций соискателя из 18 наименований на 3 страницах, приложения на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обосновывается актуальность темы диссертации, кратко формулируется задача диссертации и описывается метод ее решения.

В *первой главе* проводится обзор литературы по математическим моделям электровакуумных СВЧ-приборов. Отмечается, что задача анализа процессов в ЭВП СВЧ может быть разбита на две подзадачи: анализ процессов в электродинамических структурах, возбуждаемых заданным током, и анализ динамики пучка заряженных частиц.

Для численного анализа процессов в электродинамических структурах широко применяются математические модели, построенные на основе метода эквивалентных схем; прямой сеточной аппроксимации уравнений Максвелла (метод конечных разностей, метод конечных элементов); уравнения возбуждения, полученные из уравнений Максвелла с применением проекционных процедур для глобального базиса функций (методы Бубнова – Галеркина); вариационные методы (метод Ритца) и др.

Математические модели пучка могут представлять собой модели движения «крупных» частиц во внешнем поле, гидродинамические модели и модели бесстолкновительной плазмы, построенные на основе уравнений Власова.

Наиболее достоверные результаты получаются путем совместного решения уравнений возбуждения электродинамической структуры и уравнений движения частиц.

Существует математический аппарат, позволяющий получить решение уравнений возбуждения сложных продольно-нерегулярных волноводов в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, т.е. можно свести трехмерную задачу к одномерной и существенно упростить алгоритмы моделирования и оптимизации.

Во *второй главе* записана система уравнений Максвелла для случая продольно-нерегулярной электродинамической структуры. Для вывода этой системы использован математический аппарат преобразования координат, позволяющий свести задачу анализа процессов в сложной нерегулярной структуре к анализу процессов в регулярном волноводе с круглым сечением. Система уравнений Максвелла в преобразованных координатах сжато выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}' &= \varepsilon_0 \cdot \hat{g} \cdot \frac{\partial \vec{E}'}{\partial t} + \hat{g} \cdot \vec{\delta}', \\ \operatorname{rot} \vec{E}' &= -\hat{g}^{-1} \cdot \mu_0 \cdot \frac{\partial \vec{H}'}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \hat{g} – метрический тензор, равный:

$$\hat{g} = \sqrt{g} \cdot \begin{pmatrix} g^{11} & & g^{13} \\ \rho & g^{12} & \rho \\ g^{31} & \rho \cdot g^{22} & g^{33} \\ \rho & & \rho \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 + \rho^2 \cdot (\frac{db}{dz})^2) & 0 & -b \cdot \rho \cdot \frac{db}{dz} \\ 0 & 1 & 0 \\ -b \cdot \rho \cdot \frac{db}{dz} & 0 & b^2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Смысл вышеприведенных действий состоит в том, что, преобразуя исходную («реальную») систему координат, получаем новую ρ, φ, z в которой

внутренняя граница произвольного продольно-нерегулярного волновода преобразуется в регулярную границу цилиндра с внутренним радиусом $\rho = 1$. Это обстоятельство позволит представить поле внутри нерегулярного волновода в виде разложения поля по собственным мембранным функциям регулярного.

Решение получившейся системы уравнений ведется с использованием метода Бубнова – Галеркина. Для этого поля в анализируемом объеме представлены в виде ряда, члены которого представлены набором собственных функций данного волновода. Задача свелась к нахождению коэффициентов указанных рядов. Проекционные соотношения, следующие из требования ортогональности невязки всем базисным функциям, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \left\{ \text{rot}(\hat{g}^{-1} \cdot \text{rot} \vec{E}'_m) + \mu_0 \cdot \hat{g} \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}'_m}{\partial t^2} + \frac{\partial \vec{\delta}}{\partial t} \right] \right\} \cdot \vec{e}^{\varepsilon, m^*} \cdot \rho \cdot d\varphi \cdot d\rho \cdot e^{-im\alpha} \cdot d\omega t = 0, \\ \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \left\{ \text{rot}(\hat{g}^{-1} \cdot \text{rot} \vec{E}'_m) + \mu_0 \cdot \hat{g} \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot \frac{\partial^2 \vec{E}'_m}{\partial t^2} + \frac{\partial \vec{\delta}}{\partial t} \right] \right\} \cdot \varphi_{ni} \cdot \vec{z}_0 \cdot \rho \cdot d\varphi \cdot d\rho \cdot e^{-im\alpha} \cdot d\omega t = 0, \end{aligned} \right\} (3)$$

где $\vec{e}^{\varepsilon, m}$ и φ_{ni} – собственные базисные функции регулярного волновода для E - и H - волн.

В результате вычисления указанных интегралов получается система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая дополняется уравнениями движения электронами в электромагнитных полях.

Потери учитываются через задание импедансных условий Леонтовича – Шукина на проводящей криволинейной границе с учетом преобразованных координат. Связь между напряженностью электрического и магнитного поля у проводящей границы с учетом метрического тензора при применении преобразования координат имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} E'_z &= -\frac{\dot{W}}{b} \cdot H'_\varphi \cdot \sqrt{1 + \left(1 + \frac{db}{dz}\right)^2}, \\ E'_\varphi &= \frac{\dot{W} \cdot H'_z \cdot b}{\sqrt{1 + \left(\frac{db}{dz}\right)^2}}. \end{aligned} \right. (4)$$

Начальные условия задаются через задание входной мощности сигнала, скорости электронов, расположение электронного пучка по отношению к оси прибора.

В *третьей главе* производится выбор численного метода решения дифференциальных уравнений возбуждения и метода оптимизации.

Отмечается, что наиболее распространенные методы решения систем ОДУ, составляющие основу математической модели, например, явные одношаговые типа Рунге – Кутты, могут оказаться неустойчивыми в случае учета закрытых типов мод. Поэтому в качестве основного выбран трехточечный интерполяционный метод Адамса – Моултона третьего порядка точности, который приводит к построению блочной трехдиагональной матрицы с преобладающим диагональным элементом. Блочной матрица названа потому, что она состоит из клеток – подматриц коэффициентов искомым функций, зависящих от числа учитываемых в расчете типов волн. Метод решения этой системы – блочная матричная прогонка.

На основе анализа специфики математической модели и возможных вариантов построения оптимизационных алгоритмов выбран метод первого порядка с переменной метрикой – метод Гольдфарба.

В четвертой главе приводится описание принципов работы гирорезонансных приборов, проводится верификация модели и производится оптимизация прибора.

В качестве прототипа для верификации модели был выбран гиротрон со следующими параметрами: рабочая частота 110 ГГц; рабочий тип волны $H_{22,6}$; ускоряющее напряжение магнетронно-инжекторной пушки 96 кВ; ток пучка 40 А; индукция магнитного поля 4,3 Тл; выходная мощность 1,5 МВт; длительность импульса 5 мкс; КПД 39 %; нормированное значение магнитостатического поля – 1,0875; приведенная длина гиротрона 184 рад.

На рисунке 1 показаны результаты работы программы GYRO-K, моделирующий этот же гиротрон.

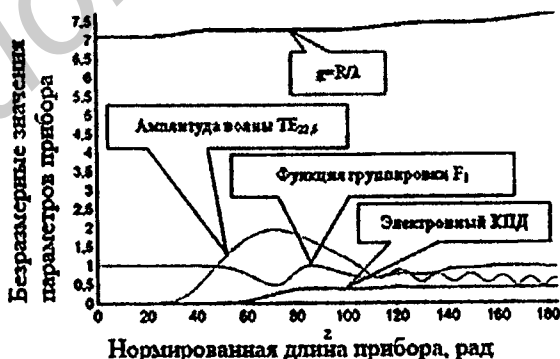


Рисунок 1 – Интегральные характеристики исходного гиротрона, полученного в результате моделирования

Как видно из рисунка 1, амплитуда волны $H_{22,6}$ в активной области резо-

натора похожа на синусоиду. Электронный КПД этого гиротрона, по расчетам автора составляет 40,5 %. Расчеты по программе MAGY показали значение 39 % . Это говорит о хорошем совпадении расчетных данных, полученных по программе GYRO-K и программе MAGY.

Отмечается, что если использовать резонатор, состоящий из секций с разными типами волн, то можно добиться того, что амплитуды волн от секции к секции будут нарастать и это приведет к повышению общего КПД прибора. При этом в каждой из секций распределение амплитуды волны будет близко к синусоидальному. Интегральные характеристики двухмодового гиротрона представлены на рисунке 2.

Возбуждаемая волна $H_{22,5}$ имеет существенно меньшую амплитуду по сравнению с возбуждаемой волной $H_{22,6}$. Это позволяет более эффективно группировать фазовый электронный сгусток электронов, что в итоге позволяет повысить электронный КПД данного гиротрона до 45 %, по сравнению с 40 % в одномодовом режиме.

Влияние моды $H_{22,5}$ сказывается и на участке максимума моды $H_{22,6}$. В итоге на выходе гиротрона обе волны имеют приблизительно одинаковую амплитуду и, следовательно, одинаковый волновой КПД по 22,5 %.

Была рассмотрена возможность создания перестраиваемого по частоте гиротрона с отражающими фильтрами.

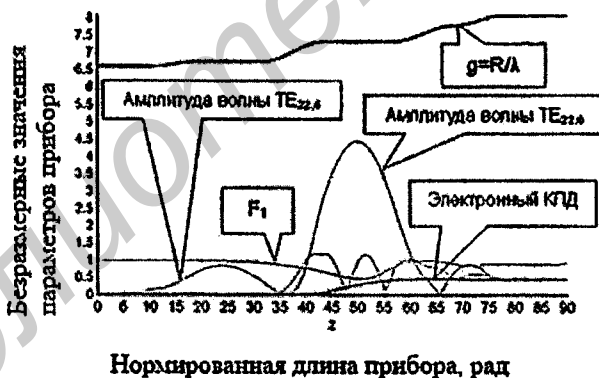


Рисунок 2 – Интегральные характеристики двухмодового гиротрона

Резонатор такого гиротрона, параметры которого представлены на рисунке 3, включает волноводный отражающий фильтр, размещенный в начале области взаимодействия спирализованного электронного потока с электромагнитными полями волновода, который отражает встречную волну и не пропускает ее на эмиттер.



Рисунок 3 – Интегральные характеристики перестраиваемого по частоте гиротрона с двумя фильтрами

В результате получается комбинированный вид взаимодействия: основной – гиро-ЛБВ и дополнительный гиро-ЛОВ. КПД такого гиротрона составляет 33 %, однако электронный поток имеет пинч-фактор $q < 1$, поэтому возможна его рекуперация на коллекторе, которая может повысить общий КПД прибора до 80 %.

В пятой главе рассмотрены возможности моделирования и оптимизации параметров гироусилителей бегущей волны.

В качестве прототипа был взят вариант гиро-ЛБВ со следующими параметрами: ток электронного пучка 5 А; ускоряющее напряжение – 100 кВ; рабочая частота 94 ГГц (рабочая длина волны $\lambda_0 = 3,1915$ мм); рабочий тип волны – нулевая гармоника моды H_{01} ; пинч фактор – $q = V_1/V_z = 1$; индукция магнитного поля составляла 35,6 кГс; начальный угловой скоростной разброс электронов $\Delta V_z/V_z = 5\%$; радиус волновода 0,201 см; радиус ведущего центра составлял 0,45 от радиуса волновода и в нормированных величинах равнялся $r_{вц} = 1,77$ рад; длина пространства взаимодействия составляла 13,6 см, что в радианах составляет 286 рад, 231 из которых занимал поглотитель на основе аквадага с удельным сопротивлением $\rho_{лог} = 70000 \rho_{св}$.

В результате оптимизации параметров этого прибора была получена конструкция гиро-ЛБВ, работающая на первой гармонике циклотронной частоты и волне типа H_{01} , с волновым КПД ~ 38 % при коэффициенте усиления 62 дБ в полосе частот 5,8 %.

Была проанализирована возможность создания гиро-ЛБВ умножителя частоты, чьи интегральные характеристики показаны на рисунке 4. Входной сигнал на моде H_{01} подавался с частотой, совпадающей с первой гармоникой циклотронной частоты, а в выходной секции возбуждалась волна H_{02} на второй гармонике циклотронной частоты.

Волновой КПД данного умножителя частоты достигает 9,5 %, а коэффициент усиления 48 дБ. Такие приборы могут обеспечивать на первой гармонике гирочастоты коэффициент усиления до 60 дБ, КПД ~37 % (в полосе частот 7 %), на второй гармонике коэффициент усиления 34 дБ, КПД ~ 13% (в полосе частот 5 %), усилитель с двукратным умножением частоты обеспечивает коэффициент усиления 48 дБ при КПД 9,5 %.

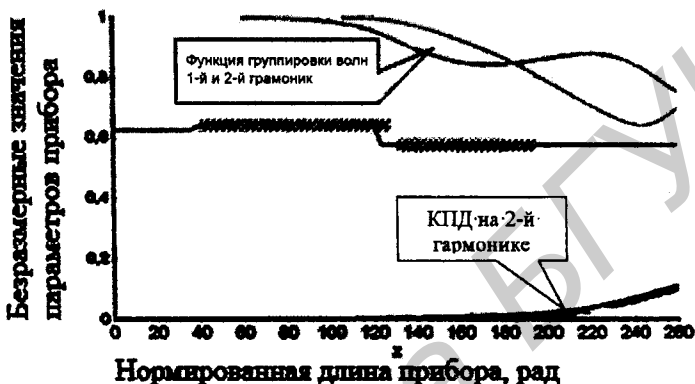
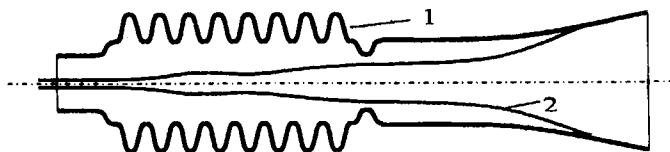


Рисунок 4 – Интегральные характеристики умножителя частоты

В шестой главе выполнено моделирование и оптимизация параметров гиротонов. В традиционных гиротонах достижение высоких КПД возможно только при наличии участка подъема магнитостатического поля до значения, соответствующего режиму гирорезонанса, что приводит к существенной зависимости КПД от начальной толщины электронного пучка. В предлагаемом в диссертации гиротоне на гофрированном резонаторе такой зависимости нет, поэтому возможно достижение высоких значений КПД и для широкого мощного электронного потока. При этом значение магнитостатического поля существенно ниже, чем в режиме гирорезонанса, что позволяет продвинуться в более коротковолновую часть сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн. Конструкция такого гиротона показана на рисунке 5.

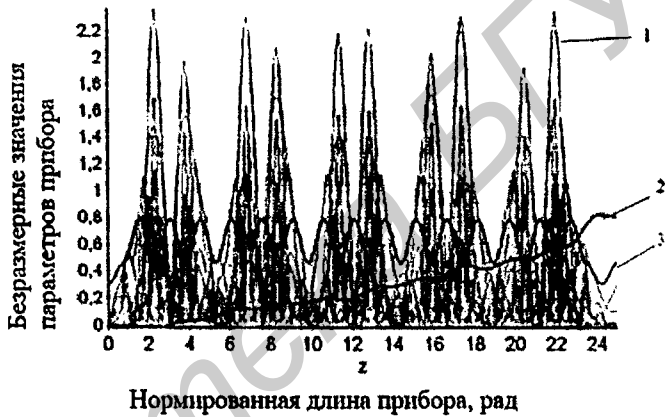


1 – профиль резонатора; 2 – электронный поток

Рисунок 5 – Конструкция гиротона

Основную роль в механизме работы такого прибора имеет волна E_{11} , которая сильно связана с волной H_{11} в гофрированном волноводе. Наличие гофрировки волновода приводит к замедлению фазовой скорости распространения волны вдоль волновода, что позволяет существенно понизить значение магнитостатического поля для достижения синхронизма электронного потока с бегущей замедленной волной.

Распределение ВЧ-полей и КПД гиротона представлены на рисунке 6. Гиротон имел следующие параметры: ускоряющее напряжение – 445 кВ; ток пучка – 7 А; длина резонатора – 25 рад; внутренний радиус гофра 2,916; амплитуда гофра 2,047; радиус выходного сужения $g_3 = 1,91$; число ребер гофра $n = 14$, нормированное значение магнитостатического поля 1,185.



1 — амплитуды волн $A_{e,m}$; 2 — КПД; 3 — профиль резонатора $b(z)/\lambda_0$
Рисунок 6 – Распределение ВЧ-полей в резонаторе гиротона

В выходном волноводе распространяется только одна H_{11} -волна. Полости гофра образуют пять связанных двугорбых резонанса в основном на волне E_{11} , хотя, как это видно из рисунка 6, в создании общего поля участвуют и другие типы волн. Всего в расчетах учитывалось 16 типов волн, восемь волн $E_{11} - E_{18}$ и восемь волн $H_{11} - H_{18}$. Электронный КПД такого гиротона достигает 81 %.

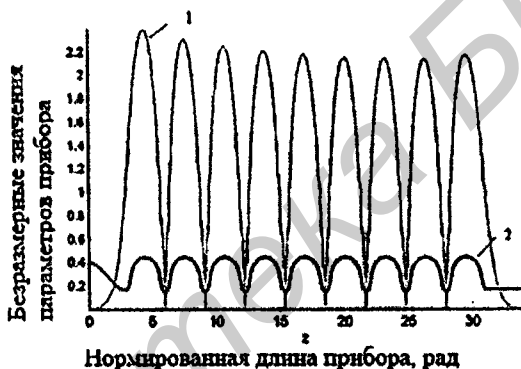
В *седьмой главе* рассматривается задача моделирования и оптимизация параметров линейных ускорителей электронов двух классов – ускорителя бегущей волны на основе замедляющей системы и ускорителя на цепочке связанных ниобиевых сверхпроводящих резонаторов.

В главе отмечается, что один из основных путей достижения оптимума параметров ускорителя бегущей волны – нерегулярная по длине замедляющая структура. Эта нерегулярность необходима для согласования продольной скорости ускоряемых заряженных частиц и фазовой скорости пространственной

гармоники выбранного типа волны: постоянно растущая скорость ускоряемых частиц требует согласованного увеличения фазовой скорости указанной гармоники.

В результате проведения моделирования и оптимизации получены следующие значения параметров прибора: повышение энергии электронов на выходе ускорителя в 167 раз, что соответствует числу 110,22 МэВ; мощность генератора накачки 150 МВт; радиус волновода $0,478 \lambda$; высота гофра $0,116 \lambda$; число зубьев гофра – 40; длина волновода $6,37 \lambda$ (где λ – рабочая длина волны генератора накачки).

В главе отмечается, что наиболее перспективными ускорителями для построения коллайдеров признаны ускорители со стоячей волной на базе сверхпроводящих резонаторов. Профиль девятирезонаторной секции ускорителя и распределение напряженности поля основного типа волны представлены на рисунке 7.



1 – амплитуда поля; 2 – профиль резонатора ($M=\omega/\omega_0= 1,001376$)

Рисунок 7 – Распределение амплитуды $|\vec{E}_z|$ по длине резонатора

В результате расчетов было установлено, что в девятисекционном резонаторе ближайшее к π -виду паразитное колебание отстоит по резонансной частоте всего на 728 кГц (рабочая частота при этом 1,3 ГГц). Это накладывает весьма жесткие условия на стабильность частоты задающего генератора ускорителя. Этому требованию может удовлетворить лишь мощный клистронный усилитель со стабилизированным маломощным генератором на входе.⁷

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Обоснована целесообразность применения метода преобразования координат и проекционной процедуры Бубнова-Галеркина для построения уравнения возбуждения продольно-нерегулярного волновода с учетом омических потерь в стенках [5–А].

2. На основе уравнений возбуждения продольно-нерегулярного волновода с потерями составлена математическая модель процессов, происходящих в электровакуумных приборах СВЧ О-типа и giroприборов, которая была реализована в компьютерной программе GYRO-K в составе комплекса КЕДР [16–А].

3. Получены параметры оптимального профиля двухволнового гиротрона на модах шепчущей галереи, обеспечивающего повышение КПД с 40 до 45 % за счет соответствующего оптимального распределения поля вдоль резонатора [3–А, 9–А, 17–А].

4. Показана возможность создания перестраиваемого по частоте гиротрона на основе отражающих волноводных фильтров [7–А].

5. Теоретически предсказана возможность создания гиро-ЛБВ с коэффициентом усиления более 62 дБ, электронным КПД 38 % и полосой усиления 5,8 % за счет введения в средней части вставки с радиопоглощающим гофрированным покрытием [2–А, 6–А, 8–А, 12–А].

6. Впервые предложен и численно исследован новый тип СВЧ-прибора – гиротон на гофрированном резонаторе, в котором не происходит пространственной группировки электронного потока, однако возможно достижения высокого коэффициента преобразования мощности РЭП в мощность электромагнитной вращающейся E_{11} -волны с КПД более 80 % и мощностью ~4,8 МВт [4–А, 15–А, 18–А].

7. Предложен новый вариант предварительного линейного ускорителя бегущей волны – ускоритель на гофрированном волноводе [10–А, 14–А].

8. Проанализированы процессы в девятирезонаторной ускорительной секции цепочки связанных сверхпроводящих резонаторов и установлены следующие закономерности [1–А, 11–А, 13–А]:

- для получения адекватных результатов расчетов сверхпроводящей ускорительной секции необходимо учитывать не менее шести низших взаимодействующих волноводных мод;

- для выравнивания амплитуд колебаний резонаторы цепочки на π -виде необходимо, чтобы первый и последний резонатор цепочки имели отличающийся от промежуточных резонаторов конфигурацию;

- ближайшее к π -виду паразитное колебание в девятисекционном резонаторе отстоит от рабочей частоты (1,3 ГГц) всего на 728 кГц, что накладывает жесткие требования к стабильности частоты опорного генератора ускорителя.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенная математическая модель электровакуумных СВЧ-приборов на основе уравнений возбуждения продольно-нерегулярного волновода с потерями, полученная на основе преобразования координат и проекционной процедуры Бубнова – Галеркина, может быть использована для построения программных пакетов моделирования и оптимизации активных и пассивных СВЧ-устройств: волноводных фильтров, генераторов, усилителей, линейных ускорителей, проходных резонаторов и пр.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке лазеров на свободных электронах, приборов СВЧ- и КВЧ- диапазонов с уникальными выходными характеристиками, в том числе работающих на новых принципах взаимодействия, разработке и оптимизации мощных генераторов для целей СВЧ-нагрева плазмы, радиолокации, радиопротиводействия, передачи и обработки информации, термоядерного синтеза, мощных РЛС, систем ПРО и ПВО нового поколения, синтеза новых материалов и т.д.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в реферируемых научных журналах

1–А. Исследование девятисекционного сверхпроводящего ниобиевого резонатора линейного ускорителя электронов / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.К. Сеницын, А.В. Сенько // Вес. Нац. акад. наук. Сер. фізика-техн. наук. – 2012. – № 2. – С. 104–107.

2–А. Колосов, С.В. Гиро-ЛБВ с высоким коэффициентом усиления / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.В. Сенько // Вес. Нац. акад. наук. Сер. фізика-техн. наук. – 2012. – № 2. – С. 97–103.

3–А. Колосов, С.В. Двухволновой гиротрон на модах шепчущей галереи / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.В. Сенько // Доклады БГУИР. – 2012. – № 2. – С. 89–91.

4–А. Колосов, С.В. Математическое моделирование гиротона на гофрированном резонаторе / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.В. Сенько // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. физико-мат. наук. – 2012. – № 2. – С. 127–132.

5–А. Колосов, С.В. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с конечной проводимостью стенок / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.В. Сенько // Техника и приборы СВЧ. – 2009. – № 2. – С. 8–13.

6–А. Колосов, С.В. Усилители и умножители на основе гиро – ЛБВ / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.В. Сенько // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5(67). – С. 51–58.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7–А. Батура, М.П. Перестраиваемый гиротрон на волне H_{01} с отражающими фильтрами / М.П. Батура, С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.В. Сенько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо`2012): материалы XXII Междунар. Крым. конф., Севаст., 10–14 сент. 2012 г. / Севастоп. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2012. – С. 367–368.

8–А. Колосов, С.В. Гиро-ЛБВ с высоким коэффициентом усиления / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.В. Сенько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо`2010): материалы XX Междунар. Крым. конф., 13–17 сент. 2010 г. : в 2 т. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севаст., 2010. – Т. 1. – С. 299–300.

9–А. Колосов, С.В. Двухмодовый гиротрон / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.В. Сенько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XXI Междунар. Крым. конф. (КрыМиКо`2011), Севастополь, 12–16 сент. 2011 г. : в 2 т. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2011. – Т. 1. – С. 327–328.

10–А. Колосов, С.В. Линейный ускоритель электронов на нерегулярном гофрированном волноводе / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.В. Сенько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XVII Междунар. Крым. конф. (КрыМиКо`2007), Севастополь, 10–14 сент. 2007 г. : в 2 т. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2007. – Т. 1. – С. 131–132.

11–А. Колосов, С.В. Расчет девятисекционного резонатора линейного коллайдера / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.В. Сенько // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : материалы XXI Междунар. Крым. конф. (КрыМиКо`2011), Севастополь, 12–16 сент. 2011 г. : в 2 т. / Севаст. нац. техн. ун-т. – Севастополь, 2011. – Т. 1. – С. 367–368.

12–А. Kolosov, S.V. Amplifiers and multipliers on GYRO-TWT / S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, A.V. Senko // Vacuum electronics conference (IVEC`2011) : materials of the Intern. conf., Bangalore, 21–24 Febr. 2011 / Inst. of Electrical a. Electronics Engineers. – Piscataway, 2011. – P. 257–258.

13–А. Kolosov, S.V. Calculation the nine cavities of linear collider / S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, A.V. Senko // Vacuum electronics conference (IVEC`2012): materials of the Intern. conf., Monterey, 24–26 Apr. 2012 / Inst. of Electrical a. Electronics Engineers. – Piscataway, 2012. – P 73 -74.

14–А. Kolosov, S.V. Linear Electron Accelerator on the Irregular Corrugated Waveguide / S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, A.V. Senko // Vacuum electronics conference (IVEC`2008): materials of the Intern. conf., Monterey, 18–20 Apr. 2008 / Inst. of Electrical a. Electronics Engineers. – Piscataway, 2008. – P. 273–274.

15–А. Kolosov, S.V. The high – power Gyrotron / S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, A.P. Kharseyev, A.V. Senko // Vacuum electronics conference (IVEC`2009): materials of the Intern. conf., Rome, 28–30 Apr. 2009 / Inst. of Electrical a. Electronics Engineers. – Piscataway, 2009. – P. 489–490.

16–А. Kolosov, S.V. The simulation codes «CEDR» / S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, A.K. Sinitzin, A.V. Aksenchik, A.V. Senko // Vacuum electronics conference (IVEC`2009) : materials of the Intern. conf., Monterey, 18–20 May. 2010 / Inst. of Electrical a. Electronics Engineers. – Piscataway, 2010. – P. 115–116.

17–А. Kolosov, S.V. Two-mode gyrotron / S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, A.V. Senko // Vacuum electronics conference (IVEC`2012): materials of the Intern. conf., Monterey, 24–26 Apr. 2012 / Inst. of Electrical a. Electronics Engineers. – Piscataway, 2012. – P. 531–532.

18–А. The high-power gyrotron on corrugated cavity / A.A. Kurayev, S.V. Kolosov, A.P. Kharseyev, A.V. Senko // Microwave and telecommunication technology : materials of the IXX Intern. Crimean conf. (CriMico`2009), Sevastopol, 14–18 Sept. 2009 / Sevastop. Nat. Techn. Univ. – Sevastopol, 2009. – P. 135–136.

РЭЗЮМЭ

Сенько Александр Васільевіч

Мадэляванне працэсаў у гірарэзанансных узмацняльніках, генератарых і лінейных паскаральніках электронаў на нерэгулярных хваляводах з улікам амічных страт у сценках

Ключавыя словы: нерэгулярныя хваляводы, гірарэзананс, ураўненні ўзбуджэння хваляводаў, магутныя электронныя пучкі, гіратрон, лямпы бягучай хвалі, лінейны паскаральнік, межавыя ўмовы на сценцы хвалявода з улікам амічных страт.

Аб'ект даследавання: працэс ўзаемадзеяння электрамагнітных хваль нерэгулярнага хвалявода з рэлятывісцкім электронным патокам.

Мэта работы: атрыманне новых матэматычных мадэляў фізічных працэсаў у электровакуумных прыборах ЗВЧ на аснове нерэгулярных хваляводаў з улікам амічных страт у сценках і аптымізацыя параметраў гірарэзанансных узмацняльнікаў і лінейных паскаральнікаў.

Была распрацавана матэматычная мадэль, якая апісвае працэсы ўзбуджэння нерэгулярнага хвалявода электронным патокам з улікам амічных страт у яго сценках і рэалізавана ў праграмным комплексе КЕДР (падсістэма GYRO-K), якая дазваляе істотна паскорыць працэс мадэлявання на параўнанні з мадэлямі заснаванымі на сеткавы метадах за кошт звесткі 3-мернай краёвай задачы да аднамернай.

Атрыманы аптымальны профіль хвалявода для міліметровага двуххвалявага гіратрона, які забяспечвае павышэнне электроннага ККД з 40 да 45 % за кошт нарастання амплітуд мод, ад першай секцыі да другой.

Прадказаная магчымасць стварэння гіра-ЛБВ з высокім каэфіцыентам узмацнення, больш за 62 дБ, электронным ККД 38 % і паласой ўзмацнення 5,7 %, за кошт увядзення ў сярэдняй частцы лямпы ўстаўкі з паглынальным электрамагнітнаю энергію пакрыццём.

Абгрунтавана магчымасць стварэння новага тыпу электроннага прыбора - гіротона з рыфленым рэзанатарам, у якім можна дасягнуць высокага каэфіцыента пераўтварэння магутнасці рэлятывісцкага электроннага патоку ў магутнасць электрамагнітнай хвалі і тыпа E_{11} якая верціцца, с ККД больш за 80 % і магутнасцю ~ 4,8 МВт.

Устаноўлена, што найбліжэйшы да працоўнага л-тыпу ваганні, ў 9-секцыйным звышправодзячым ніобіевым рэзанатары лінейнага паскаральніка электронаў, паразітны тып $8/9\pi$ ваганні адлягае ад асноўнага за ўсё на 728 кГц пры працоўнай частаце 1,3 ГГц.

Атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны для распрацоўкі высокаэфектыўных канструкцый узмацняльнікаў магутнасці і генератараў ЗВЧ.

РЕЗЮМЕ

Сенько Александр Васильевич

Моделирование процессов в гирорезонансных усилителях, генераторах и линейных ускорителях электронов на нерегулярных волноводах с учетом омических потерь в стенках

Ключевые слова: нерегулярные волноводы, гирорезонанс, уравнения возбуждения волноводов, мощные электронные пучки, гиротрон, лампы бегущей волны, линейный ускоритель, граничные условия на стенке волновода с учетом омических потерь.

Объект исследования: процесс взаимодействия электромагнитных волн нерегулярного волновода с релятивистским электронным потоком.

Цель работы: получение новых математических моделей физических процессов в электровакуумных приборах СВЧ на основе нерегулярных волноводов с учетом омических потерь в стенках и оптимизация параметров гирорезонансных усилителей и линейных ускорителей.

Была разработана математическая модель, описывающая процессы возбуждения нерегулярного волновода электронным потоком с учетом омических потерь в его стенках и реализована в программном комплексе КЕДР (подсистема GYRO-K), которая позволяет существенно ускорить процесс моделирования по сравнению с моделями основанными на сеточных методах за счет сведения 3-мерной краевой задачи к одномерной.

Получен оптимальный профиль волновода для миллиметрового двухволнового гиротрона, который обеспечивает повышение электронного КПД с 40 до 45 % за счет нарастания амплитуд возбуждаемых мод от первой резонансной секции ко второй.

Предсказана возможность создания гиро-ЛБВ с высоким коэффициентом усиления, более 62 дБ, с электронным КПД 38 % и полосой усиления 5,8 %, за счет введения в средней части лампы вставки с поглощающим энергиею покрытием.

Обоснована возможность создания нового типа электронного прибора – гиротона на гофрированном резонаторе, в котором можно достичь высокого коэффициента преобразования мощности РЭП в мощность электромагнитной вращающейся E_{11} -волны с КПД более 80 % и мощностью ~4,8 МВт.

Установлено, что ближайший к рабочему π -виду колебания в девятисекционном сверхпроводящем ниобиевом резонаторе линейного ускорителя электронов и позитронов паразитный тип $8/9\pi$ колебания отстоит от основного всего на 728 кГц при рабочей частоте 1,3 ГГц.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки высокоэффективных конструкций усилителей мощности и генераторов СВЧ.

SUMMARY

Alexander V.Senko

Modeling processes in gyroresonance amplifiers, generators, and linear electron accelerators for corrugated waveguides with the ohmic losses in the walls

Keywords: corrugated waveguides, gyroresonance, equations of waveguide excitation, powerful electron beams, gyrotron, traveling wave tube, a linear accelerator, boundary conditions on the wall of the waveguide with the ohmic losses.

Object of study: the interaction of electromagnetic waves with relativistic electron beam in the corrugated waveguide.

The purpose of the study: Obtain of new mathematical models of physical processes in the vacuum microwave devices based on corrugated waveguides with the ohmic losses in the walls and parameter optimization gyroresonance amplifiers and linear accelerators.

The was developed a mathematical model describing the processes of excitation of corrugated waveguide by electron beam with the ohmic losses in the walls and implemented in the software package CEDAR (subsystem GYRO-K), which can significantly speed up the simulation in comparison with models based on grid methods through transformation 3 -dimensional boundary value problem to one-dimensional

The optimum profile of the waveguide for millimeter two-wave gyrotron have got, which enhances electron efficiency from 40 to 45 % due to the growth of the amplitudes of excited modes from the first resonance section to the second section.

The was predicted possibility of a creation gyro-TWT with high gain of more than 62 dB, with an electronic efficiency of 38 % and bandwidth of gain 5.8 %, due to the introduction in the middle of the gyro - TWT insert with electromagnetic energy absorbing coating.

The was substantiated possibility of creating a new type of electronic device – gyrotrons on corrugated cavity, which can achieve high power conversion ratio of relativistic electron beam in the power of the rotating electromagnetic waves E_{11} type with efficiency of over 80% and output power $\sim 4,8$ MW.

Found that the nearest to the main π -type oscillations in the 9-cell superconducting niobium cavity linear accelerator electrons and positrons type $8/9\pi$ parasitic oscillation is separated from the main by only 728 kHz operating frequency of 1,3 GHz.

The results can be used to develop a high-effective microwave amplifiers of power, which are widely used in the creation of powerful air defense and anti missile systems, in new generation of linear accelerators of electrons and protons to create new materials and installations in nuclear fusion.

Научное издание

Сенько Александр Васильевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ГИРОРЕЗОНАНСНЫХ
УСИЛИТЕЛЯХ, ГЕНЕРАТОРАХ И ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЯХ
ЭЛЕКТРОНОВ НА НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДАХ С УЧЕТОМ
ОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СТЕНКАХ**

Специальность 01.04.03 - Радиопизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 08.02.2013.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,4.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 43.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009
220013, Минск, П. Бровка, 6