

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.385.6

РАК
Алексей Олегович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОВОЛНОВЫХ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ПРИБОРОВ И ЛИНЕЙНЫХ
УСКОРИТЕЛЕЙ НА НЕРЕГУЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ С КОНЕЧНЫМ ИМПЕДАНСОМ СТЕНОК**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Минск 2013

чреждении образования «Белорусский государственный
тики и радиоэлектроники».

Научный
руководитель

Кураев Александр Александрович,
доктор физико-математических наук, профессор, заве-
дующий кафедрой антенн и устройств СВЧ учреждения
образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Официальные
оппоненты:

Аксенчик Анатолий Владимирович,
доктор физико-математических наук, доцент, профессор
кафедры вычислительных методов и программирования
учреждения образования «Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники»

Макаров Валентин Владимирович,
кандидат физико-математических наук, старший научный
сотрудник лаборатории лазерной плазмодинамики науч-
но-исследовательского учреждения «Институт приклад-
ных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ

Оппонирующая
организация

Белорусский государственный университет

Защита состоится 2 мая 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссер-
таций Д 02.15.05 при учреждении образования «Белорусский государствен-
ный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013,
Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89,
e-mail: dissovet@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектро-

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальной задачей является создание генераторов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, позволяющих получать сверхмощные электромагнитные импульсы (до десятков гигаватт) при относительно высоких значениях КПД. Потребность в таких источниках существует во многих областях науки и техники, таких, как термоядерный синтез, синтез новых материалов, создание эффективных систем ПВО и ПРО, радиоэлектронная борьба, создание новейших мощных РЛС, системы слежения за астероидами, запитка ускорителей заряженных частиц и др.

Наиболее перспективными источниками сверхмощного СВЧ излучения являются многомодовые релятивистские черенковские генераторы (МРЧГ).

Существующие программные комплексы, позволяющие моделировать подобные приборы, обладают рядом различных недостатков, таких, как упрощенные модели, не учитывающие важных особенностей взаимодействия (закритические моды, потери в стенках, расслоение электронного потока, влияние пространственного заряда и др.) либо учитывающие их некорректно; использование численных алгоритмов с низким порядком точности (например метод с перешагиванием в РИС-методах); большой объем вычислений; использование дополнительных процедур, компенсирующих погрешности, вносимые грубыми численными методами. Совокупность этих недостатков приводит к тому, что результаты моделирования, как правило, носят качественный, а не количественный характер, а потребность в большом объеме вычислений затрудняет либо делает невозможным проведение процедуры оптимизации.

В диссертационной работе развита самосогласованная нелинейная математическая модель черенковских приборов, основанная на уравнениях возбуждения продольно-нерегулярных волноводов с круговым сечением. Особенностью данных уравнений является корректный учет конечной проводимости стенок электродинамической системы и сведение исходной трехмерной задачи к одномерной, что позволило получить высокую скорость расчетов (несколько секунд на один вариант) и выполнять оптимизацию (требующую вычислений сотен и тысяч вариантов) за приемлемое время.

Развитая в работе модель и разработанные на её основе программы могут быть использованы не только для моделирования черенковских приборов, но, с учетом аналогии в краевой задаче, и для моделирования одноячеечных полых сверхпроводящих резонаторов – ключевых элементов коллайдеров на линейных ускорителях.

С использованием разработанных моделей и программ были выполнены моделирование и поиск оптимальных вариантов одноячеечных сверхпроводящих ниобиевых резонаторов для линейного ускорителя электронов и позитро-

нов, моделирование, оптимизация МРЧГ и анализ процессов в них. Найдены оптимальные по КПД варианты многомодовых черенковских приборов с различным количеством распространяющихся и учитываемых закритических мод, проанализирована возможность использования рекуперации для повышения КПД, проведен анализ влияния динамического расслоение релятивистского электронного потока на КПД прибора и предложены эффективные варианты его компенсации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа выполнялась в рамках одного из научных направлений учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», утвержденных Министерством образования Республики Беларусь, – «Методы моделирования и оптимизации в радиоэлектронных системах и устройствах».

Тема диссертационной работы соответствует тематике НИР, выполнявшихся на кафедре АиУСВЧ в период с 2009 по 2012 г.

Результаты диссертационной работы нашли отражение в отчетах по следующим НИР:

- НИР №09-1044Б «Расчитать распределение электрического поля замедляющей системы резонатора в виде синусоидального гофра» (№ ГР 20092855);

- НИР №10-1096Б «Разработка пакета программ и выполнение оптимизации профиля нерегулярной гофрированной электродинамической системы генератора СВЧ в диапазоне 5–10 ГГц» (№ ГР 20102609);

- НИР №10-1226Б «Расчет одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов» (№ ГР 20100450);

- НИР №11-1120Б «Расчет девятизвенного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов» (№ ГР 20115638);

- НИР №12-1001Б «Разработка программного обеспечения и расчет одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора с использованием профессиональных систем программирования» (№ ГР 2012203).

Тематика перечисленных работ входит в перечень приоритетных направлений (раздел 6.4 «Новые типы лазеров в широком спектральном, временном и мощностном диапазонах, в том числе твердотельные и волоконно-оптические лазеры, лазеры на свободных электронах», раздел 12.1 «Физические и математические методы и их применение для решения актуальных проблем естествознания, техники, новых технологий, экономики и социальных наук», раздел 13

«Научное обеспечение укрепления обороноспособности и повышения уровня национальной безопасности Республики Беларусь»), утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585.

Цель и задачи исследования

Целью работы является создание самосогласованных нелинейных математических моделей релятивистских черенковских усилителей и генераторов сверхбольшой мощности на нерегулярных полых гофрированных волноводах, а также линейных ускорителей электронов и позитронов на сверхпроводящих ниобиевых резонаторах с учетом многомодовых режимов работы и импедансных условий на металлических поверхностях электродинамических систем; реализация этих моделей в программах анализа и оптимизации, оптимизация на их основе рабочих характеристик указанных устройств и установление физических особенностей оптимальных электромагнитных процессов в этих устройствах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Сформулировать уравнения возбуждения сторонними электрическими токами продольно-нерегулярного полого волновода с круговым сечением с учетом потерь в стенках волновода в форме, обеспечивающей устойчивость численных методов, реализующих решение самосогласованной задачи для многомодовых режимов.

2. Сформулировать строгие уравнения возбуждения резонатора с импедансными условиями на металлических стенках.

3. Разработать нелинейную самосогласованную модель взаимодействия релятивистских электронных потоков с электромагнитными полями многомодовых нерегулярных электродинамических систем и устойчивые численные методы решения возникающей двухточечной краевой задачи.

4. Выполнить расчет и оптимизацию конфигурации одноячеечного и многоячеечного сверхпроводящих ниобиевых резонаторов линейного ускорителя электронов и позитронов с максимальной (при заданной мощности питания) напряженностью электрического поля на оси.

5. Выполнить расчет и оптимизацию по КПД релятивистских черенковских усилителей и генераторов сверхбольшой мощности на нерегулярных гофрированных многомодовых волноводах, выяснить влияние потерь в стенках волновода и динамического расслоения электронного потока на максимально достижимые КПД, исследовать возможность компенсации динамического расслоения электронного потока за счет подбора геометрии поток-

электродинамическая система, проанализировать возможность повышения КПД за счет рекуперации энергии электронов на коллекторе.

Объектом исследования являются электромагнитные поля и волны в нерегулярных волноводах и резонаторах в черенковских усилителях и генераторах сверхбольшой мощности и линейных ускорителях на сверхпроводящих ниобиевых резонаторах.

Предмет исследования в соответствии с целью и задачами диссертации включает в себя математические модели нелинейных процессов взаимодействия релятивистских электронных потоков с электродинамическими полями, методы формирования оптимальных распределений электромагнитных полей в нерегулярных электродинамических системах.

Положения, выносимые на защиту

1. Уравнения возбуждения продольно-нерегулярных волноводов с круговым сечением, отличающиеся от известных тем, что в них корректно учтена конечная проводимость стенок, а форматом результирующих уравнений является система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) 2-го порядка относительно амплитуд электрической напряженности нормальных волн в преобразованной системе координат.

2. Математически строго сформулированные уравнения возбуждения объемных резонаторов с импедансными граничными условиями на стенках, отличающиеся от существующих в современной литературе корректными выражениями для амплитуд связанных нормальных колебаний.

3. Нелинейная математическая модель релятивистских черенковских генераторов и усилителей сверхбольшой мощности на нерегулярных гофрированных волноводах с катодными фильтрами-модуляторами с учетом потерь в стенках волновода, динамического расслоения электронного потока, многомодового режима взаимодействия.

4. Устойчивые пошаговые алгоритмы решения краевой двухточечной задачи для системы ОДУ, представляющие формулировку модели черенковских генераторов и усилителей.

5. Оптимальные конфигурации отдельной ячейки сверхпроводящего резонатора ускорителя электронов и позитронов, а также распределения электромагнитных полей в ней, обеспечивающие оптимальный режим работы ускорителя.

6. Оптимальные по КПД варианты многоволновых релятивистских черенковских генераторов и результаты исследования механизмов взаимодействия в них в режиме кооперации мод и их преобразования, динамического расслоения электронного потока, влияния потерь в стенках волновода и модуляции

онных свойств катодных фильтров, образующие комплекс новых физических знаний о нелинейных процессах в релятивистских черенковских приборах, позволивший предложить новые методы повышения КПД указанных приборов.

Личный вклад соискателя

Личный вклад соискателя заключается в развитии самосогласованной нелинейной математической модели многоволновых релятивистских черенковских приборов и реализующих её устойчивых вычислительных алгоритмов; развитии теории возбуждения резонаторов с корректным учетом импеданса стенок; выводе устойчивого алгоритма решения ОДУ 2-го порядка и приложении полученного алгоритма к расчету траекторий движения крупных частиц и расчету электромагнитных полей в продольно-нерегулярных волноводах с круговым сечением.

Научным руководителем, доктором физико-математических наук, профессором А.А. Кураевым определена цель и постановка задач. Значительная помощь в разработке математических моделей и программного обеспечения, в анализе полученных результатов была оказана научным руководителем, а также доктором физико-математических наук, профессором А.К. Синицыным.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих научно-технических конференциях: IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) 2010, 2011, 2012; Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо, Севастополь), 2009, 2010, 2011, 2012; 8-я международная МНТК «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» РТ-2012, Севастополь, 2012; НТК студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР 2009.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 34 научных работах, в том числе 1 монография, 1 статья в коллективной монографии, 12 статей в научных журналах (9,7 авт. л.), 20 материалов научно-технических конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет 30 авт. л.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. В первой главе приводится вывод уравнений возбуждения продольно-нерегулярного волновода с круговым сечением, а также уравнения возбуждения произвольно-нерегулярного коаксиального волновода. Во второй главе представлены уравнения возбуждения резонаторов с конечной проводимостью стенок, приводятся результаты моделирования одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителей электронов и позитронов. В третьей главе приводится эффективный алгоритм численного интегрирования дифференциальных уравнений 2-го порядка и примеры его использования при расчете электронно-вакуумных СВЧ приборов. Четвертая глава посвящена моделированию релятивистских многоволновых черенковских генераторов и изучению процессов в них.

Общий объем работы составляет 132 страницы, в том числе 36 рисунков на 31 странице, 12 таблиц на 10 страницах, библиографический список из 54 наименований литературных источников на 4 страницах, список собственных публикаций соискателя из 34 наименований на 4 страницах, приложения на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приводятся основные сведения о достоинствах и конструктивных особенностях релятивистских многоволновых черенковских генераторов и резонаторов для линейных ускорителей, кратко описываются существующие подходы моделирования таких приборов.

В первой главе приведен вывод уравнений возбуждения нерегулярных (гофрированных) полых волноводов с круговым сечением электронными потоками.

Для формулировки уравнений возбуждения E_{0i} -волн применен следующий подход: в преобразованной системе исключается \mathbf{E}' и строится уравнение 2-го порядка относительно \mathbf{H}' . При таком подходе краевая задача для E_{0i} -волн становится скалярной (\mathbf{H}' имеет только одну компоненту $\rho H'_\varphi$), а результирующая система ОДУ относительно амплитуд нормальных волн приводится к четной форме. При четной форме ядра (главных частей) системы ОДУ численные алгоритмы при соответствующей формулировке оказываются устойчивыми, при смешанной же форме устойчивость численных алгоритмов не обеспечена. Под термином «четная форма» понимается, что в главной части ОДУ содержатся только четные операции дифференцирования: нулевая (сама функция), вторая производная, четвертая, шестая и т.д. При «смешанной форме» в ОДУ имеются как четные, так и нечетные операции дифференцирования (первая, третья, пятая и т.д.).

Полученные в результате уравнения возбуждения E_{0i} -волн в четной форме имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}' &= \operatorname{Re} \sum_{m=0}^M \dot{\mathbf{H}}'_m e^{jm\omega t}, \quad \mathbf{E}' = \operatorname{Re} \sum_{m=0}^M \dot{\mathbf{E}}'_m e^{jm\omega t}, \quad \dot{\mathbf{E}}'_m = j(m\omega\mu_2)^{-1} \operatorname{rot} \dot{\mathbf{H}}_m, \\ \dot{\mathbf{H}}'_m &= \sum_{p=1}^P b(z) \dot{C}_{mp}^M(z) \Phi_0 J_1(\nu_{0p}\rho), \quad J_0(\nu_{0p}) = 0, \quad p = 1, 2, \dots, \\ \frac{d^2 \dot{C}_{mp}^M}{dz^2} &+ \left(m^2 - \frac{\nu_{0p}^2}{b^2} + \frac{1}{b^2} \left(\frac{db}{dz} \right)^2 + \frac{2d^2b}{b dz^2} - \frac{1}{b^2} \left(\frac{db}{dz} \right) \frac{I_{3pp}}{h_{pp}} \right) \dot{C}_{mp}^M + \\ &+ \sum_{i=1, i \neq p}^I \left\{ -\frac{2}{b^2} \frac{db}{dz} \frac{I_{1ip}}{h_{pp}} \left(\frac{db}{dz} \dot{C}_{mi}^M + b \frac{d\dot{C}_{mi}^M}{dz} \right) + \right. \\ &\left. + \dot{C}_{mi}^M \left[\left(\frac{3}{b^2} \left(\frac{db}{dz} \right)^2 + \frac{1}{b} \frac{d^2b}{dz^2} \right) \frac{I_{1ip}}{h_{pp}} - \frac{1}{b^2} \left(\frac{db}{dz} \right) \frac{I_{3ip}}{h_{pp}} \right] \right\} = I_{mp}(z), \end{aligned}$$

$$\text{где } I_{1pi} = \int_0^1 J_0(v_{0i}\rho) \cdot J_1(v_{0p}\rho) v_{0i} \rho^2 d\rho, \quad I_{3pi} = \int_0^1 J_1(v_{0i}\rho) \cdot J_1(v_{0p}\rho) (v_{0i}\rho)^2 d\rho,$$

$$h_{pp} = \frac{1}{2} J_1^2(v_{0p}), \quad I_{mp}(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \left(\frac{\partial J'_z}{\partial \rho} - \frac{\partial J_\rho}{\partial z} \right) \cdot J_1(v_{0p}\rho) \rho d\rho \cdot e^{-jmat} d\omega t,$$

v_{0i} – i -й корень $J_0(x)$ (функции Бесселя), $\rho = r/b(z)$, $b(z) = k_0 b'(z)$, $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$, $b'(z)$ – внутренний радиус волновода, ω – рабочая частота, i – радиальный индекс волны, m – номер гармоники ω , J – плотность тока электронного потока.

В дополнение к уравнениям возбуждения продольно-нерегулярного волновода с круговым сечением в работе с применением аналогичного подхода выведены уравнения возбуждения нерегулярного коаксиального волновода, также играющего значительную роль при создании электронных СВЧ-приборов.

Для численного решения полученных уравнений возбуждения наиболее эффективными оказались следующие подходы:

1. Приведение системы обыкновенных дифференциальных уравнений с помощью конечно разностной схемы к системе линейных алгебраических уравнений, и решение последней с использованием метода блочно-матричной прогонки.

2. Использование «четных» алгоритмов, учитывающих, что функция, её четные и нечетные производные определены в разных точках (более подробно данные алгоритмы рассмотрены в третьей главе).

Во второй главе представлены уравнения возбуждения объемных резонаторов и результаты моделирования и оптимизации резонаторов для линейных ускорителей заряженных частиц.

При моделировании и оптимизации СВЧ приборов, включающих в свой состав объемные резонаторы, принципиально важно использовать точные уравнения возбуждения резонаторов с учетом конечной проводимости стенок.

В работе представлена система уравнений связанных вынужденных колебаний для нагруженного резонатора в следующем виде:

$$\dot{\mathbf{E}} = \sum_p \dot{A}_p \dot{\mathbf{E}}_p, \quad \dot{\mathbf{H}} = \sum_p \dot{B}_p \dot{\mathbf{H}}_p,$$

$$j(\omega_p^2 - \omega^2) \dot{B}_p - \sum_S \omega \omega_p [(1+j) Q_{sp\sigma}^{-1} + (1+j\alpha_H) Q_{spH}^{-1}] \dot{B}_S = (\omega V_p^m + \omega_p V_p^e) N_p^{-1};$$

$$\dot{A}_p = \frac{\omega_p}{\omega} \dot{B}_p + jV_p^e / \omega N_p, \quad p=1,2,\dots$$

где ω_p – собственные частоты, $V_p^e = \int_{V_p} \delta^e \dot{\mathbf{E}}_p^* dV$, $V_p^m = \int_{V_p} \delta^m \dot{\mathbf{H}}_p^* dV$,

$$N_p = \int_{V_p} \mu_a H_{pm}^2 dV_p = \int_{V_p} \varepsilon_a E_{pm}^2 dV_p, \quad Q_{sp\sigma}^{-1} = (\omega_p N_p (1+j))^{-1} \dot{W}_\sigma^0 \int_{S_\sigma} \dot{\mathbf{H}}_{st} \dot{\mathbf{H}}_{pt}^* dS_\sigma,$$

$$Q_{spH}^{-1} = (\omega_p N_p (1+j\alpha_H))^{-1} \int_{S_H} \dot{W}_H(S_H) \dot{\mathbf{H}}_{st} \dot{\mathbf{H}}_{pt}^* dS_H, \quad S_\sigma - \text{поверхность металлических стенок с проводимостью } \sigma, S_H - \text{поверхность окна связи с нагрузкой, на которой заданы импедансные условия } \dot{W}_H^0 = (\dot{E}_{\tau H} / \dot{H}_{\tau H})|_{S_H}.$$

В случае резонанса ($\omega \approx \omega_p$), $Q_{sp}^{-1} \rightarrow 0$ имеем

$$\dot{B}_p = -j \frac{\omega V_p^m + \omega_p V_p^e}{(\omega_p^2 - \omega^2 + j\omega\omega_p[(1+j)Q_{p\sigma}^{-1} + (1+j\alpha_H)Q_{pH}^{-1}])N_p};$$

$$\dot{A}_p = j \frac{V_p^e(\omega_p^2 - \omega^2 + j\omega\omega_p[(1+j)Q_{p\sigma}^{-1} + (1+j\alpha_H)Q_{pH}^{-1}] - \omega_p\omega V_p^m - \omega_p^2 V_p^e)}{\omega(\omega_p^2 - \omega^2 + j\omega\omega_p[(1+j)Q_{p\sigma}^{-1} + (1+j\alpha_H)Q_{pH}^{-1}])N_p}.$$

Полученные в работе строгие уравнения возбуждения объемных резонаторов с учетом импеданса стенок позволяют корректно моделировать как электронные приборы СВЧ, так и устройства СВЧ, включающие объемные резонаторы с конечной проводимостью стенок.

Второй раздел главы посвящен моделированию и оптимизации одиночных резонаторов для линейных ускорителей электронов и позитронов.

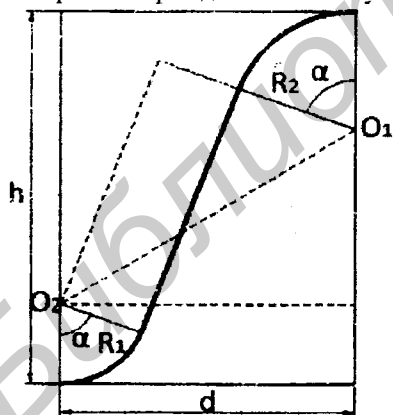


Рисунок 1 – Профиль резонатора

На рисунке 1 представлена часть профиля объемного одиночного резонатора, аппроксимированная окружностями и прямой, и основные параметры, его описывающие: радиусы скругления R1, R2, высота h и ширина d.

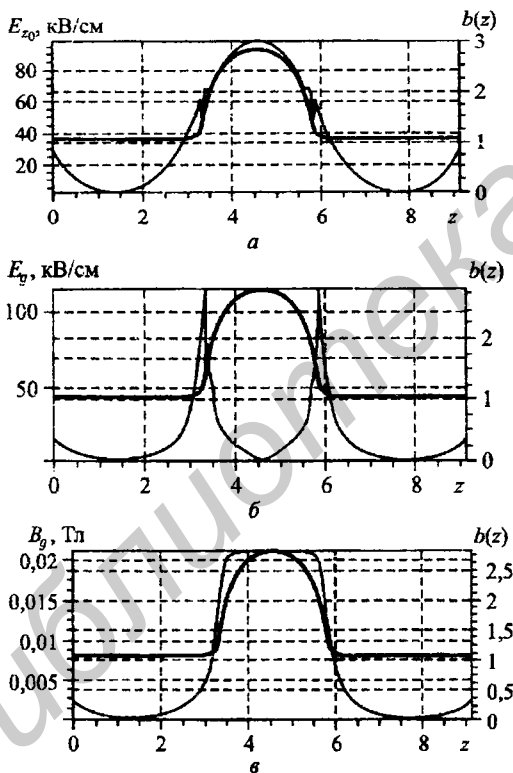
За основу расчетов был взят имеющийся экспериментальный макет резонатора, изготовленный в лаборатории FermiLab, параметры и основные характеристики которого известны. Вначале было выяснено, на каком расстоянии от резонатора следует подводить к нему мощность через трубку дрейфа. Результат

расчета с достаточно длинным участком трубки дрейфа представлен на рисунке 2. Подвод мощности осуществляется с двух сторон. Видно, что амплитуда

подводимой волны вначале уменьшается, прежде чем волна достигнет области резонатора. Точка минимума, по-видимому, и является наилучшей для подвода.

Распределение напряженности поля вдоль границы резонатора E_g имеет два характерных максимума в области сопряжения резонатора с трубой дрейфа, причем максимальное значение E_g примерно равно максимальному значению на оси. Распределение магнитной индукции B_g на границе также имеет характерный вид – в центре резонатора наблюдается едва заметный провал и соответственно имеется два слабо выраженных максимума.

Анализ влияния геометрических размеров на характеристики резонатора показал, что с увеличением R_2 и уменьшением R_1 как геометрический фактор (A_Q), так и величина E_{int} возрастают. Однако уже при $R_2 > 1,15$ при уменьшении $R_1 < 0,305$ значение E_{gmax} становится большим, чем E_{zomax} , что нежелательно



а – E на оси; б – E на границе; в – B на границе;
 $b_0 = 1,063, R_1 = 0,31, R_2 = 1,1, h = 1,755$

Рисунок 2 – Распределение полей
 в резонаторе

ввиду возможности возникновения пробоя. Поэтому можно рекомендовать для резонатора параметры $R_1 = 0,3-0,31, R_2 = 1,2-1,1$.

Также в работе был рассмотрен вариант резонатора с трапециевидным профилем и проанализировано влияние крутизны боковых стенок на параметры резонатора. В результате были установлены следующие зависимости: с увеличением крутизны боковых стенок (Δ) резонансная высота уменьшается, но при этом возрастает A_Q (следовательно, и добротность) и максимальное значение ускоряющего напряжения E_{zomax} . Однако при $\Delta > 0,65$ величина максимальной напряженности поля на стенке резонатора становится большей, чем на оси $E_{gmax} > E_{zomax}$, что, как уже отмечалось ранее, нежелательно.

В целом можно отметить, что при значительном измене-

нии формы резонатора его геометрический фактор (и добротность) изменяются в пределах 20 %, а максимум ускоряющего напряжения – в пределах 30 %.

В третьей главе приведен вывод и анализ эффективности нового метода численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка. Конечно-разностное представление производной является некорректной операцией и требует доопределения точки, где определена (существует) эта производная, что соответствует в определенной степени регуляризации процедуры вычисления производной. С учетом этой особенности был выведен алгоритм численного интегрирования ОДУ 2-го порядка в следующих формах: предсказания-коррекции, явной и модифицированной (для случая, когда вторая производная зависит от первой).

Для уравнений движения предложенный алгоритм в явной форме выглядит следующим образом:

$$x_{t+\Delta t} = x_t + v_t \Delta t + \frac{1}{8}(5a_t - a_{t-\Delta t}) \Delta t^2 + O(\Delta t^3),$$

$$v_{t+\Delta t} = v_t + \frac{1}{8}(3a_{t+\Delta t} + 6a_t - a_{t-\Delta t}) \Delta t + O(\Delta t^3).$$

где $x(t)$ – координата частицы, $v(t)$, $a(t)$ – соответственно её скорость и ускорение, Δt – шаг интегрирования по времени.

Для оценки эффективности были рассмотрены уравнение с известным аналитическим решением и моделирование распространения волн H_{01} и E_{01} в продольно-нерегулярном волноводе с круговым сечением. При этом рассматривались случаи распространяющихся, закритических и локально закритических волн. Было проведено сравнение как с методами, предназначенными для решения ОДУ 2-го порядка: алгоритм Бимана, скоростной алгоритм Верле, так и методами, предназначенными для решения ОДУ 1-го порядка (путем сведения ОДУ 2-го порядка к системе ОДУ первого порядка): Рунге–Кутты 4-го порядка, Аламса–Башфорта–Мултона, Розенброка 2-го порядка и др.

Результаты сравнения показали перспективность использования предложенного алгоритма как для повышения скорости расчетов (возможно увеличение скорости более чем в 50 раз по сравнению с методом Рунге–Кутты 4-го порядка), так и для повышения их точности и лучшего сохранения энергии моделируемых объектов.

В четвертой главе приведена самосогласованная нелинейная математическая модель релятивистских черенковских генераторов и усилителей с катодным фильтром-модулятором и замедляющей системой в виде гофрированного волновода, а также результаты моделирования и оптимизации, полученные с использованием этой модели.

Для формулировки самосогласованной модели релятивистских черенковских приборов уравнения возбуждения полого продольно-нерегулярного вол-

новода с круглым сечением для E_{0i} -волн были дополнены уравнениями движения релятивистских электронов.

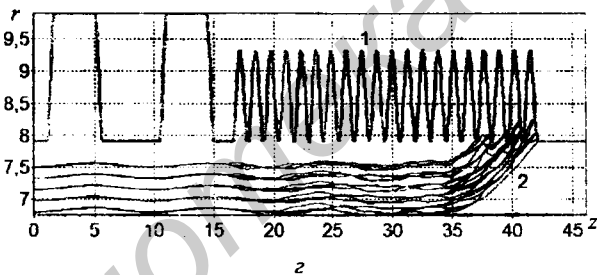
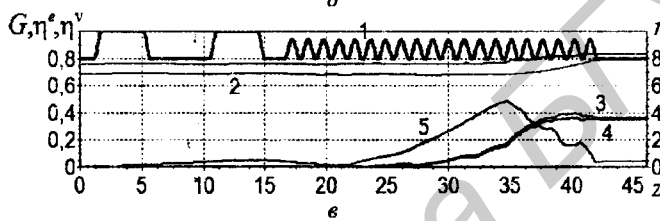
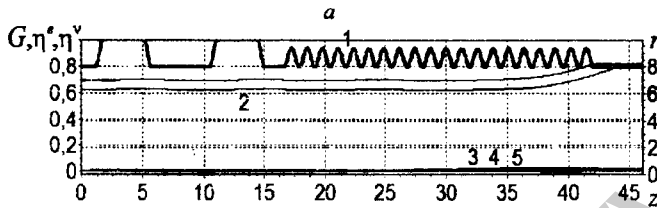
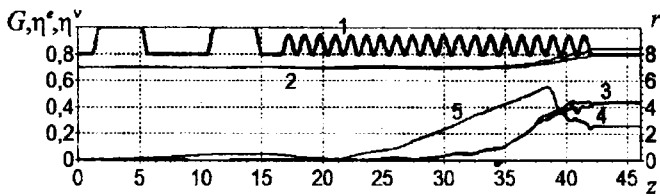
С помощью программной реализации представленной математической модели были найдены варианты оптимальных по КПД одно- и двухмодовых черенковских генераторов. Показано, что использование оптимального нерегулярного профиля позволяет получить КПД порядка 40 – 50 %. Для дальнейшего повышения КПД рассмотрено применение рекуперации энергии электронов на коллекторе. Результаты представлены в таблице. На основе полученных данных можно сделать вывод, что для генератора с меньшим КПД и в результате равномерно распределенными по скоростям на выходе прибора электронами использование рекуперации позволило получить прирост КПД более 50 %. В генераторах с изначально высоким КПД применение рекуперации может оказаться неэффективным.

Таблица – Технический КПД при использовании рекуперации

№	1	2	3	4	5	6	7	8
КПД генератора, %	23,5	39,6	52,3	42	46	12	42,8	13,14
Технический КПД, %	35,84	64,14	51,95	55,74	63,13	68,9	54,37	68
Прирост КПД, %	12,34	24,54	-0,35	13,74	17,13	56,9	11,57	54,86

Для исследования влияния динамического расслоения электронного потока на КПД генератора был рассмотрен двухмодовый генератор. Расчетный КПД по однослойной модели составил 43 % (рисунок 3, а). Учет пяти слоёв и конечной толщины пучка ($\Delta r_{0j} = 0,7$) привел в решении к отсутствию генерации (рисунок 3,б).

Приближение пучка к гофру на расстояние, близкое к толщине пучка привело к увеличению КПД до 35 %. Причину этого поясняет рисунок 3, в, г. Внутренний слой находится в условиях взаимодействия, близких к условиям единственного слоя в варианте 1, кроме того, он имеет ту же протяженность области взаимодействия, что и электронный поток в варианте 1 – он осаждается на электродинамическую систему в конце гофра. Остальные слои, находящиеся под действием более интенсивного электромагнитного поля, имеют пропорционально сокращающуюся длину области взаимодействия (это обусловлено неоднородностью фокусирующего магнитного поля в конце области взаимодействия), что и выравнивает эффективность взаимодействия по слоям. Также показана возможность компенсации влияния динамического расслоения на КПД генератора за счет оптимизации профиля электродинамической системы и ускоряющего напряжения.



а – вариант 1, КПД=43 %; б – вариант 2, КПД=0 %;

в, г – вариант 3, КПД=35 %;

1 – замедляющая система, 2 – электронный поток, 3, 4 – волновой и электронный КПД, 5 – функция группировки

Рисунок 3 – Характеристики генераторов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Сформулированы уравнения возбуждения продольно-нерегулярных волноводов с круговым сечением, отличающиеся от известных тем, что в них корректно учтена конечная проводимость стенок, а форматом результирующих уравнений является система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) 2-го порядка относительно амплитуд электрической напряженности нормальных волн в преобразованной системе координат [1–А, 16–А, 18–А, 19–А, 20–А, 23–А, 24–А, 29–А].

2. Математически строго сформулированы уравнения возбуждения объемных резонаторов с импедансными граничными условиями на стенках, отличающиеся от существующих в современной литературе корректными выражениями для амплитуд нормальных колебаний [1–А, 2–А, 3–А].

3. Развита нелинейная математическая модель релятивистских черенковских генераторов и усилителей сверхбольшой мощности на нерегулярных гофрированных волноводах с катодными фильтрами-модуляторами с учетом потерь в стенках волновода, динамического расслоения электронного потока, многомодового режима взаимодействия [1–А, 4–А, 13–А, 14–А, 17–А].

4. Предложены и использованы устойчивые пошаговые алгоритмы решения краевой двухточечной задачи для системы ОДУ, представляющие формулировку модели черенковских генераторов и усилителей [1–А, 5–А, 8–А, 12–А, 15–А, 21–А, 22–А, 27–А, 32–А, 34–А].

5. Найдены и проанализированы оптимальные конфигурации отдельной ячейки сверхпроводящего резонатора ускорителя электронов и позитронов, а также распределения электромагнитных полей в них, обеспечивающие оптимальный режим работы ускорителя [1–А, 6–А, 10–А, 11–А, 30–А].

6. В результате моделирования и оптимизации получены варианты оптимальных по КПД многоволновых релятивистских черенковских генераторов; приведены результаты исследования механизмов взаимодействия в них в режиме кооперации мод и их преобразования, динамического расслоения электронного потока, влияния потерь в стенках волновода и модуляционных свойств катодных фильтров, образующие комплекс новых физических знаний о нелинейных процессах в релятивистских черенковских приборах, позволивший предложить новые методы повышения КПД указанных приборов [1–А, 4–А, 7–А, 9–А, 13–А, 14–А, 26–А, 28–А, 31–А, 33–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Сформулированные математические модели (уравнения возбуждения продольно-нерегулярных волноводов с круглым сечением, уравнения возбуждения произвольно-нерегулярных коаксиальных волноводов, уравнения возбуждения резонаторов, самосогласованные уравнения релятивистских ЛБВ и ЛОВ) и пакеты программ, на них основанные, могут быть использованы при разработке и проектировании широкого класса мощных электронных приборов СВЧ: релятивистских многоволновых черенковских генераторов и усилителей, резонаторов линейных ускорителей, гиротронов, gyro-ЛБВ, гироклистронов и многих других.

Предложенный в работе алгоритм численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка может быть использован для решения широкого круга физико-математических задач, процессы и объекты в которых описываются указанными уравнениями.

Представленные в работе оптимальные варианты черенковских приборов и сверхпроводящих ниобиевых резонаторов, а также рекомендации по повышению их эффективности могут быть использованы в производстве при разработке устройств и приборов на их основе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1—А. Нерегулярные электродинамические структуры. Теория и методы расчета / М.П. Батура, А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак – Минск : Бестринт, 2011. – 250 с.

Статья в коллективной монографии

2—А. Нерегулярные волноводы / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак, А.К. Сеницын, С.И. Яроменок // Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. В 2 т. Т. 1 : Стационарные процессы / А.В. Аксентик [и др.] ; под общ. ред. А.А. Кураева и Д.И. Трубецкова. – М. : Физматлит, 2009. – С. 167–211.

Статьи в научных журналах

3—А. Кураев, А.А. Возбуждение объемных резонаторов с конечной проводимостью стенок / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак // Минск : Вести НАН Беларуси Серия физико-технических наук. – 2007. – № 3. – С. 93–99.

4—А. Релятивистские ЛБВ и ЛОВ на нерегулярных волноводах с катодным фильтром-модулятором / А.А. Кураев, И.В. Лущицкая, Т.Л. Попкова, А.О. Рак, А.К. Сеницын // Изв. вузов «ПНД». – 2008. – Т. 16. – № 3. – С. 142–155.

5—А. Кураев, А.А. Устойчивые методы расчета нерегулярных волноводов / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак // Техника и приборы СВЧ – 2010. – № 1. – С. 19–25.

6—А. Расчет одноячеечного сверхпроводящего ньюбиевого резонатора для ускорителей электронов и позитронов / Н.С. Азарян, М.А. Батурицкий, Ю.А. Будагов, В.В. Глаголев, Д.Л. Демян, И.Н. Кижлай, С.В. Колосов, А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак, А.К. Сеницын, Г.В. Трубников, Г.Д. Ширков // Препринт Объединенного института ядерных исследований г. Дубна. – 2011. – 24 с.

7—А. Кураев, А.А. Компенсация влияния динамического расслоения электронного потока в черенковских генераторах с неоднородным магнитным полем / А.А. Кураев, А.К. Сеницын, А.О. Рак // Доклады БГУИР. – 2011. – № 4 (58). – С. 36–42.

8—А. Четная форма уравнений возбуждения волн E_{0j} типа в нерегулярном волноводе с круговым сечением / М.П. Батура, А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак // Доклады БГУИР. – 2011. – № 5 (59). – С. 42–48.

9–А. Кураев, А.А. О возможности компенсации влияния динамического расслоения электронного потока в сверхмощных релятивистских черенковских генераторах / А.А. Кураев, А.К. Сеницын, А.О. Рак // Техника и приборы СВЧ. – 2011. – № 1. – С. 7–12.

10–А. Computation of Single Cell Superconducting Niobium Cavity for Accelerator of Electrons and Positrons / N.S. Azaryan, M.A. Baturitsky, Yu.A. Budagov, V.V. Glagolev, D.L. Demin, I.N. Kizhlai, S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, T.L. Popkova, A.O. Rak, A.K. Sinitsyn, G.V. Trubnikov, G.D. Shirkov // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2012. – Vol. 9. – No. 2. – P. 150–162.

11–А. Расчет одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителей электронов и позитронов / Н.С. Азарян, М.А. Батурицкий, Ю.А. Будагов, В.В. Глаголев, Д.Л. Демин, И.Н. Кижлай, С.В. Колосов, А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак, А.К. Сеницын, Г.В. Трубников, Г.Д. Ширков // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». – 2012. – № 2 (172). – С. 247–268.

12–А. Рак, А.О. Эффективный алгоритм численного интегрирования уравнений движения крупных частиц в приборах СВЧ / А.О. Рак // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5 (67). – С. 86–92.

13–А. Оптимальные по КПД релятивистские генераторы и усилители. В 2 ч. Ч. I / В.Ф. Кравченко, А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак // Физические основы приборостроения. – 2012. – Т. 1. – № 2. – С 41–64.

14–А. Оптимальные по КПД релятивистские генераторы и усилители. В 2 ч. Ч. II / В.Ф. Кравченко, А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак // Физические основы приборостроения. – 2013. – Т. 2. – № 1. – С 78–99.

Статьи в сборниках тезисов докладов

15–А. Батура, М.П. Четная и нечетная дискретизация в моделировании электронных приборов с нерегулярными электродинамическими системами / М.П. Батура, Т.Л. Попкова, А.О. Рак // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2009): материалы 19-й междунар. Крымск. конф., 14–18 сент. 2009. – Севастополь, 2009. – С. 131–132.

16–А. Колосов, С.В. Уравнения возбуждения произвольно-нерегулярного коаксиального волновода / С.В. Колосов, А.А. Кураев, А. О. Рак // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2009): материалы 19-й междунар. Крымск. конф., 14–18 сент. 2009. – Севастополь, 2009. – С. 133–134.

17–А. Кураев, А.А. Релятивистские ЛБВ и ЛОВ на нерегулярных волноводах / А.А. Кураев, А.К. Сеницын, А.О. Рак // НИРС 2008: сб. научн. работ студ. вузов РБ – Минск, 2009. – С. 50–53.

18–A. Terahertz range coaxial klynoorotron oscillator / A.A. Kurayev, A.O. Rak, A.K. Sinitsyn, V.D. Yeryomka // International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, Ukraine, 21–26 June 2010. – Kharkiv, 2012. – P. 1–3.

19–A. Kolosov, S.V. Excitation equations for the longitudinally-irregular waveguide with finite conductions of the walls / S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, A.O. Rak // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2010), Monterey, USA, 18–20 May 2010. – Monterey, 2010. – P. 373–374.

20–A. Coaxial klynoorotron / A.A. Kurayev, A.O. Rak, A.K. Sinitsyn, V.D. Yeryomka // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2010), Monterey, USA, 18–20 May 2010. – Monterey. – P. 377–378.

21–A. Even Sampling Method for the Simulation of the Electron Devices with Irregular Electrodynamical Systems / M.P. Batura, A.A. Kurayev, T.L. Popkova, A.O. Rak // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2010): материалы 20-й междунар. Крымск. конф., 13–17 сент. 2010. – Севастополь, 2010. – С. 229–230.

22–A. Compounded Algorithms for the Simulation of the Electron Devices with Irregular Waveguides / M.P. Batura, A.A. Kurayev, T.L. Popkova, A.O. Rak // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2010): материалы 20-й междунар. Крымск. конф., 13–17 сент. 2010. – Севастополь, 2010. – С. 231–232.

23–A. General Excitation Equations for the Arbitrary Longitudinally-Irregular Waveguide with Finite Conductions of the Walls / S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, T.L. Popkova, A.O. Rak // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2010): материалы 20-й междунар. Крымск. конф., 13–17 сент. 2010. – Севастополь, 2010. – С.233–234.

24–A. Kurayev, A.A. Efficiency of Coaxial Klynoorotron / A.A. Kurayev, A.O. Rak, A.K. Sinitsyn // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2010): материалы 20-й междунар. Крымск. конф., 13–17 сент. 2010. – Севастополь, 2010. С. 259–260.

25–A. Кураев, А.А. О возможности компенсации влияния динамического расслоения электронного потока в сверхмощных релятивистских черенковских генераторах / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.О. Рак // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2010): материалы 20-й междунар. Крымск. конф., 13–17 сент. 2010. – Севастополь, 2010. – С.261–262.

26–A. Kurayev, A.A. Even Sampling for the Simulation of the Electron Devices with Irregular Electrodynamical Systems / A.A. Kurayev, T.L. Popkova, A.O. Rak // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2011), Bangalore, India, February 21– 24, 2011. – Bangalore, 2011. – P. 125–126.

27–А. Кураев, А.А. Compounded Algorithms for the Simulation of the Electron Devices with Irregular Waveguides / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2011), Bangalore, India, February 21 - 24, 2011. – Bangalore, 2011. – P. 127–128.

28–А. Кураев, А.А. About Compensation the Electronic Beam Dynamic Stratification Influence in Super-power Relativistic Cherenkov Oscillators / А.А. Кураев, А.О. Рак, А.К. Синицын // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2011), Bangalore, India, February 21–24, 2011. – Bangalore, 2011. – P. 249–250.

29–А. Кураев, А.А. Excitation Equations for the Arbitrarily-Irregular Coaxial Waveguide / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2011), Bangalore, India, February 21–24, 2011. – Bangalore, 2011. – P. 353–354.

30–А. Расчет ячейки ускорителя электронов и позитронов на сверхпроводящем ниобиевом резонаторе / И.Н. Кижлай, С.В. Колосов, А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.О. Рак, А.К. Синицын // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2011): материалы 21-й междунар. Крымск. конф., 12–16 сент. 2011. – Севастополь, 2011. – С. 285–286.

31–А. Кураев, А. А. Моделирование заграждающего фильтра для трехмодового сверхмощного черенковского генератора / А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.О. Рак // Научные стремления 2011: – сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. молод. учен. 14–18 нояб. 2011. В 2 т. – 2011. – Т. 1. – С. 581–584.

32–А. Кураев, А.А. Эффективный алгоритм решения уравнений движения электронов в приборах СВЧ / А.А. Кураев, А.О. Рак // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2012: материалы 8-й междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 23–27 апр. 2012. – Севастополь, 2012. – С. 405.

33–А. Kurayev, А.А. Simulation of Cathode Rejector for Three-mode Super-power Cherenkov Oscillator / А.А. Kurayev, А.О. Rak // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2012), Monterey, California, April 24–26, 2012. – Monterey, 2012. – P. 411–412.

34–А. Батура, М.П. Эффективный алгоритм численного интегрирования уравнений движения крупных частиц в приборах СВЧ / М.П. Батура, А.А. Кураев, А.О. Рак // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо 2012): материалы 22-й междунар. Крымск. конф., 10–14 сент. 2012. – Севастополь, 2011. – С. 175–176.



Рак Аляксей Алегавіч

МАДЭЛЯВАННЕ І АПТЫМІЗАЦЫЯ ШМАТХВАЛЁВЫХ РЭЛЯТЫВІСЦКІХ ЧЭРАНКОЎСКІХ ПРЫБОРАЎ І ЛІНЕЙНАГА ПАСКАРАЛЬНІКА НА НЕРЭГУЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРАДЫНАМІЧНЫХ СІСТЭМАХ З КАНЧАТКОВЫМ ІМПЕДАНСАМ СЦЕНАК

Ключавыя словы: шматхвалёвы рэлятывісцкі чэранкоўскі генератар, лампа бягучай хвалі, лампа зваротнай хвалі, лінейны паскаральнік, рэзанатар, ураўненні ўзбуджэння, нерэгулярны хвалявод, лікавае інтэграванне.

Мэта працы: стварэнне самаўзгодненых нелінейных матэматычных мадэляў рэлятывісцкіх чэранкоўскіх узмацняльнікаў і генератараў звышвылікай магутнасці на нерэгулярных полях хваляводах, а таксама лінейных паскаральнікаў электронаў і пазітронаў на ланцужках звязаных звышправодзячых ніобіевых рэзанатараў з улікам шматмодавых рэжымаў працы і імпедансных умоў на металічных паверхнях электрадынамічных сістэм, рэалізацыя гэтых мадэляў у праграмах аналізу і аптымізацыі, аптымізацыя на іх аснове працоўных характарыстак названых прылад і ўстанаўленні фізічных асаблівасцяў аптымальных электрамагнітных прапэсаў у гэтых прыладах.

Метады даследавання: метады блочна-матрычнай прагонкі, метады Рунге-Кутты, метады Нэлдара-Міда.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: сфармуляваны ўраўненні ўзбуджэння падоўжна-нерэгулярных хваляводаў, карэктна ўлічваючы канчатковую праводнасць сценак. Матэматычна строга сфармуляваны ўраўненні ўзбуджэння аб'ёмных рэзанатараў з імпеданснымі межавымі ўмовамі на сценах, адрозныя ад існуючых у сучаснай літаратуры карэктнымі выразамі для амплітуд нармальных ваганняў. Развіта нелінейная матэматычная мадэль рэлятывісцкіх чэранкоўскіх прыбораў звышвылікай магутнасці на нерэгулярных гафрыраваных хваляводах з катоднымі фільтрамі-мадулятарамі з улікам страт у сценах хвалявода, дынамічнага расслаення электроннага патоку, шматмодавага рэжыму ўзаемадзеяння. Атрыманы ўстойлівы пакрокавы алгарытм лічбавага інтэгравання АДУ другога парадку. Знойдзены і прааналізаваны аптымальныя канфігурацыі чэранкоўскіх прыбораў і рэзанатараў для лінейных паскаральнікаў зараджаных часціц. Праведзены аналіз механізмаў ўзаемадзеяння ў іх. Прадстаўлены вынікі могуць быць выкарыстаны пры праектаванні і распрацоўцы шырокага класа электронных ЗВЧ-прылад.

РЕЗЮМЕ

Рак Алексей Олегович

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОВОЛНОВЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ПРИБОРОВ И ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ НА НЕРЕГУЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С КОНЕЧНЫМ ИМПЕДАНСОМ СТЕНОК

Ключевые слова: многоволновой релятивистский черенковский генератор, лампа бегущей волны, лампа обратной волны, линейный ускоритель, резонатор, уравнения возбуждения, нерегулярный волновод, численное интегрирование.

Цель работы: создание самосогласованных нелинейных математических моделей релятивистских черенковских усилителей и генераторов сверхбольшой мощности на нерегулярных полых гофрированных волноводах, а также линейных ускорителей электронов и позитронов на сверхпроводящих ниобиевых резонаторах с учетом многомодовых режимов работы и импедансных условий на металлических поверхностях электродинамических систем; реализация этих моделей в программах анализа и оптимизации, оптимизация на их основе рабочих характеристик указанных устройств и установлении физических особенностей оптимальных электромагнитных процессов в этих устройствах.

Методы исследования: метод блочно-матричной прогонки, метод Рунге-Кутты, метод Нелдера-Мида.

Полученные результаты и их новизна: сформулированы уравнения возбуждения продольно-нерегулярных волноводов, корректно учитывающие конечную проводимость стенок.

Математически строго сформулированы уравнения возбуждения объемных резонаторов с импедансными граничными условиями на стенках, отличающиеся от существующих в современной литературе корректными выражениями для амплитуд нормальных колебаний.

Развита нелинейная математическая модель релятивистских черенковских приборов сверхбольшой мощности на нерегулярных гофрированных волноводах с катодными фильтрами-модуляторами с учетом потерь в стенках волновода, динамического расслоения электронного потока, многомодового режима взаимодействия.

Получен устойчивый пошаговый алгоритм численного интегрирования ОДУ 2-го порядка.

Найдены и проанализированы оптимальные конфигурации черенковских приборов и резонаторов для линейных ускорителей заряженных частиц. Проведен анализ механизмов взаимодействия в них.

Представленные результаты могут быть использованы при проектировании и разработке широкого класса электронных СВЧ-устройств.

SUMMARY

Rak Alexei Olegovich

MODELING AND OPTIMIZATION RELATIVISTIC MULTIMODE CHERENKOV DEVICES AND LINEAR ACCELERATORS ON THE IRREGULAR ELECTRODYNAMIC SYSTEMS WITH FINITE WALLS IMPEDANCE

Keywords: multi-wave relativistic cherenkov oscillator, traveling wave tube, backward-wave linear accelerator, cavity excitation equations, irregular waveguide, numerical integration.

Purpose: to create self-consistent nonlinear mathematical models of high power relativistic cherenkov amplifiers and oscillators on irregular hollow waveguides, and linear accelerators of electrons and positrons in chains of superconducting niobium cavities associated with the multi-mode operation and impedance conditions on the metal surfaces of electrodynamic systems, software implementation of these models for numerical in analysis and optimization, optimization performance characteristics of these devices and establish the optimal physical properties of the electromagnetic processes in these devices.

Research methods: block-matrix screw, Runge–Kutta method, Nelder–Mead method.

Results and novelty: excitation equation of longitudinally irregular waveguides correctly take into account the finite conductivity of the walls.

The excitation equations of cavity resonators with impedance boundary conditions at the walls were mathematically rigorous formulated. This equations differed of the correct expressions for the amplitudes of the normal modes from those existing in the current literature.

The nonlinear mathematical model of high power relativistic cherenkov devices on irregular waveguides with cathode filters-modulators with the losses in the waveguide walls, dynamic stratification of the electron beam, multi-mode interaction was developed.

Stable algorithm for the numerical integration of second-order ODE was created.

The optimal configuration of cherenkov devices and resonators for linear particle accelerators were obtained and analyzed. The analysis of the mechanisms of interaction between them is conducted.

Presented results can be used in the design and development of a wide class of electronic microwave devices

Научное издание

Рак Алексей Олегович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОВОЛНОВЫХ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ПРИБОРОВ И ЛИНЕЙНЫХ
УСКОРИТЕЛЕЙ НА НЕРЕГУЛЯРНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ С КОНЕЧНЫМ ИМПЕДАНСОМ СТЕНОК**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 27.03.2013	Формат 60X84 1/16.	Бумага офсетная,
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 91.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 30.04.2009
220013, Минск, П. Бровка, 6.