

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ”

УДК 621.385.6

Лушицкая
Ирина Владимировна

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧЕРЕНКОВСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ И
ГЕНЕРАТОРОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.03 – “Радиофизика”

Минск 2007

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

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

Официальные оппоненты: Богуш Вадим Анатольевич
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой метрологии и
стандартизации учреждения образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Крот Александр Михайлович
доктор технических наук, профессор,
заведующий лабораторией моделирования
самоорганизующихся систем ГНУ
«Объединенный институт проблем
информатики Национальной академии
наук Беларуси»

Отпонирующая организация: Белорусский государственный университет

Защита состоится 6 марта 2008 года 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 Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел.293-89-89,
dissovet@bsuir.by

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Электродинамические системы современных мощных и сверхмощных электронных приборов СВЧ (гиротронов, релятивистских ламп бегущей и обратной волны – ЛБВ и ЛОВ), включая вводы и выводы энергии, представляют собой отрезки нерегулярных волноводов. Причем, режим этих волноводов оказывается чаще всего многоволновым. Улучшение характеристик указанных сверхмощных приборов СВЧ связано прежде всего с оптимизацией профиля их электродинамических систем. Это, в свою очередь, требует развития адекватной теории и методов расчета произвольно-нерегулярных волноводов.

Современное развитие вакуумной электроники СВЧ на одно из первых мест выдвигает проблему создания строгих математических моделей процессов взаимодействия электронного потока с высокочастотными полями в электронных приборах, разработки эффективных методов и алгоритмов их реализации на ЭВМ, создания пакетов программ, составляющих базу систем автоматизации проектирования электронных приборов СВЧ, отбора на основе машинного моделирования наиболее эффективных по КПД вариантов и типов приборов и выяснения на этой основе их предельных возможностей.

В последнее время важнейшее значение приобретают исследования в области создания сверхмощных релятивистских черенковских усилителей и генераторов, предназначенных для эффективных систем ПРО и ПВО нового типа, основанных на электромагнитном поражении бортовой аппаратуры ВТО.

Развитию строгой теории таких приборов и оптимизации на ее основе как профиля электродинамической системы в области взаимодействия электронов с электромагнитным полем, так и профиля катодного фильтра и выходного рупора, а также исследованию особенностей электромагнитных процессов и посвящена данная диссертационная работа.

Связь работы с крупными научными программами, темами

Диссертация выполнена в рамках одного из основных научных направлений БГУИР – «Методы моделирования и оптимизации в радиоэлектронных системах и устройствах». Результаты диссертационной работы нашли свое отражение в следующих госбюджетных НИР, выполнявшихся на кафедрах «ВМиП», «АиУСВЧ» в период с 2003 по 2007г: «Разработка теории возбуждения продольно-нерегулярных коаксиальных волноводов и ее приложение к задачам моделирования и оптимизации черенковских и гирорезонансных источников колебаний СВЧ больших мощностей и коаксиальных устройств СВЧ» (ГБЦ № 00-3042, № гос. регистрации 20002228); «Комбинированные процессы излучения релятивистских электронных потоков в многомодовых нерегулярных электродинамических структурах» (ГБЦ № 01-3082, № гос. регистрации

20012365); «Оптимизация по КПД сверхмощных релятивистских многоволновых черенковских генераторов на гофрированных волноводах» (Грант РБ ГБЦ № 06-3098, № гос. регистрации 20066765).

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка адекватной математической модели и численная оптимизация по КПД сверхмощных релятивистских многоволновых черенковских генераторов и усилителей на гофрированных волноводах (включая оптимизацию профиля электродинамической системы, катодного отражающего фильтра и выходного рупорного излучателя), установление с помощью методов вычислительного эксперимента физических закономерностей оптимальных по эффективности режимов взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем. Достижение поставленной цели потребовало решения следующих основных задач:

1. Формулировки уравнений возбуждения произвольно-нерегулярного полого волновода с учетом конечной проводимости стенок.
2. Вывода строгих самосогласованных нелинейных уравнений для релятивистских черенковских генераторов и усилителей на E_{0r} модах.
3. Разработки математической модели черенковского генератора и усилителя.
4. Проведения на основе двумерной модели оптимизации профилей электродинамических систем черенковских усилителей и генераторов с учетом закритических волн, исследования особенности оптимальных процессов взаимодействия, влияния фокусирующего магнитного поля.
5. Разработки математических моделей выходного рупора и заграждающего фильтра.
6. Оптимизации профиля выходного рупора релятивистских черенковских генераторов и заграждающего фильтра на E_{0r} моде с учетом закритических волн.

Объектом исследования являются сверхмощные черенковские генераторы и усилители на нерегулярных волноводах с рабочими типами волн E_{0r} .

Предмет исследования – двумерные математические модели указанных приборов и оптимизация профилей электродинамических систем приборов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Уравнения возбуждения произвольно-нерегулярного полого волновода, впервые выведенные с учетом конечной проводимости металлической стенки. Они позволяют строго решать широкий круг задач в электродинамике: расчет и оптимизация электронных приборов, фильтров,

резонаторов, рупорных излучателей, конвертеров типов волн и других устройств на нерегулярных волноводах.

2. Впервые сформулированная двумерная нелинейная модель черенковских генераторов и усилителей на E_{0i} модах с учетом закритических мод и поперечного взаимодействия электронов с полем, приводящего наряду с черенковским к циклотронному типу взаимодействия. С помощью двумерной нелинейной модели можно не только обеспечить достоверность расчетов, но и исследовать физические процессы и явления в черенковских приборах, в частности, многовидовое взаимодействие электронов с E_{0i} полями.

3. Доказательство того, что в согласованных отрезках периодических нерегулярных волноводов азимутально-симметричные волны электрического типа не обладают периодичностью второго рода. Выявленное несоответствие распределения волн E_{0i} - типа частному решению Флоке в согласованных отрезках нерегулярных волноводов приводит к отказу от установившегося в течение многих лет упрощенного представления о взаимодействии электронов с «синхронной пространственной гармоникой» азимутально-симметричной волны электрического типа в О – приборах и необходимости учета в расчетах процесса взаимодействия полного поля.

4. Найденные оптимальные профили черенковских усилителей, генераторов и выходных рупоров на E_{0i} модах нерегулярного волновода, результаты исследования характеристик и предельных возможностей этих устройств. Доказательство того, что в нерегулярном рупоре на E_{0i} волнах в отличие от линейного рупора за счет взаимодействия и преобразования волн E_{0i} - E_{0j} возможно существенное улучшение диаграммы направленности.

Личный вклад соискателя

Руководителем А.А.Кураевым определена цель и постановка задач. Совместно с ним проводилось обсуждение способов и методов решения поставленных задач, оценка полученных результатов. Совместно с А.А.Кураевым обсуждалось общее направление исследований, оценка полученных результатов. С А.К. Синециным обсуждалась методика проведения исследования релятивистских многоволновых черенковских генераторов, усилителей, выходного рупорного излучателя. Диссертанту принадлежит доминирующая роль в разработке математических моделей и компьютерных программ, решении конкретных задач на их основе и анализе результатов, формулировка выводов и рекомендаций.

Апробация результатов диссертации

Материалы диссертации докладывались на 14-й, 16-й, 17-й международных Крымских микроволновых конференциях: КрыМиКо'2004, КрыМиКо'2006, КрыМиКо'2007, Украина, Севастополь; International Vacuum

Electronics Conference, Netherlands, 2005; VI, VII международных школах-семинарах “Современные информационные технологии”, Браслав, 2003, 2004; 40-й, 41-й, 42-й научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 2004-06; 3-ей международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 2007.

Опубликованность результатов

Основные результаты диссертации опубликованы в 14 научных работах, среди которых 4 статьи в научных журналах, 10 работ в сборниках материалов международных конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет 52 страницы (130000 печатных знаков).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. В первой главе получены уравнения возбуждения с учетом конечной проводимости стенок волновода. Во второй главе выведены двумерные самосогласованные нелинейные уравнения черенковских усилителей и генераторов на E_{0i} модах. В третьей и четвертой главах найдены оптимальные профили черенковских генераторов, усилителей, выходного рупора и катодного отражающего фильтра. Общий объем работы составляет 106 страниц, в том числе 37 рисунков на 29 страницах, 3 приложения на 4 страницах и список использованных источников, включающий 70 наименований на 6 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** описаны механизмы генерации и усиления электромагнитных волн электронными потоками в лампах бегущей волны (ЛБВ) и лампах обратной волны (ЛОВ) – «черенковских» усилителях и генераторах, дан обзор способов оптимизации по КПД ЛБВ и ЛОВ, указаны основные недостатки этих способов и определена актуальность темы диссертационной работы.

В **первой главе** на основе метода преобразования координат Стрэттона-Свешникова уравнения Максвелла сформулированы в неортогональной координатной системе, в которой граница внутренней поверхности произвольно-нерегулярного полого волновода отображается на регулярный цилиндр единичного радиуса.

В новой системе координат на основе проекционного метода Галеркина-Канторовича получена система обыкновенных дифференциальных уравнений для амплитуд связанных волн в нерегулярном волноводе,

возбуждаемом произвольной системой источников в приближении идеально проводящих стенок волновода. В ней также учтены потери в стенках волновода [1-А, 3-А, 7-А].

Вторая глава содержит формулировку самосогласованных нелинейных уравнений релятивистских черенковских генераторов и усилителей на E_{0i} модах в общем случае – с учетом неоднородного направляющего магнитостатического поля, потерь в стенках электродинамической системы, динамического расслоения электронного потока, полей закритических мод.

Уравнения возбуждения:

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{A}_{mi}}{dz} &= (m \cdot W \cdot \dot{V}_{mi} + v_{0i} \cdot \dot{C}_{mi}) + (l-j)2S_{\sigma} \frac{\sqrt{1+(db/dz)^2}}{b} \sum_k \dot{Y}_{mk} \frac{J_l(v_{0k})}{J_l(v_{0i})}; \quad (2.1) \\ \dot{C}_{mi} &= -\frac{v_{0i} \dot{V}_{mi}}{m \cdot W \cdot b^2} + \frac{db}{bdz} \left(-\frac{\dot{A}_{mi}}{v_{0i}} + \sum_{k \neq i} \frac{2 \cdot v_{0i}}{v_{0k}^2 - v_{0i}^2} \cdot \frac{J_l(v_{0k})}{J_l(v_{0i})} \dot{A}_{mk} \right) - \\ &- \frac{jG_0}{m \cdot W \cdot e_{0i} \cdot b^2} \cdot \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N J_0 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) e^{-jmW\theta_i}; \\ \frac{d\dot{V}_{mi}}{dz} &= -m \cdot W \left\{ \dot{A}_{mi} + \left(\frac{db}{dz} \right)^2 \cdot \left[\dot{A}_{mi} \frac{1}{3} \left(1 + \frac{4}{v_{0i}^2} \right) + \sum_{k \neq i} \frac{4 \cdot (v_{0i}^2 + v_{0k}^2)}{(v_{0i}^2 - v_{0k}^2)^2} \cdot \frac{J_l(v_{0k})}{J_l(v_{0i})} \dot{A}_{mk} \right] - \right. \\ &- b \frac{db}{dz} \cdot \left(-\frac{\dot{C}_{mi}}{v_{0i}} + \sum_{k \neq i} \frac{2 \cdot v_{0k}}{v_{0i}^2 - v_{0k}^2} \cdot \frac{J_l(v_{0k})}{J_l(v_{0i})} \dot{C}_{mk} \right) \left. \right\} + \\ &+ \frac{G_0}{e_{0i} b} \cdot \left(\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N J_l \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \left(\frac{\beta_{rl}}{\beta_{zl}} - \frac{r_l}{b} \frac{db}{dz} \right) \right) j e^{-jmW\theta_i}; \end{aligned}$$

где v_{0i} - i -ый корень $J_0(x)$, $b(T) = k_0 \cdot b'(T)$, $k_0 = 2\pi/\lambda_0 = \omega_0/c$, $b'(T)$ - внутренний радиус волновода (штрихом помечены размерные величины, имеющие одинаковое обозначение с безразмерными), $W = \omega/\omega_0$, ω - рабочая частота, ω_0 - базовая частота, i - радиальный индекс волны, m - номер гармоники ω , β_{rl}, β_{zl} - радиальная и продольная нормированные скорости, $G_0 = 2eI_0/\varepsilon_0 m_0 c^3$, I_0 - ток пучка, $\dot{A}_{mi} = (b' \cdot \dot{E}'_{rmi} \cdot e)/(m_0 c^2)$, $\dot{C}_{mi} = (\dot{E}'_{zmi} \cdot e)/(\omega_0 m_0 c)$, $\dot{V}_{mi} = (b' \cdot \dot{B}'_{\phi mi} \cdot e)/(m_0 c)$, $\dot{E}'_{rmi}, \dot{E}'_{zmi}, \dot{B}'_{\phi mi}$ - амплитуды компонент волны, e, m_0 - заряд и масса покоя электрона, c - скорость света в пустоте, r_l - радиус движения l -ого электрона, $r_l = k_0' r_l'$, $\theta_i = \omega t_i$, $z = z' k_0$, $S_{\sigma} = \sqrt{\pi W / \sigma \lambda_0 \mu_a c}$, σ - удельная проводимость стенки, μ_a - ее магнитная проницаемость, $e_{0i} = 0,5 J_1^2(v_{0i})$.

Уравнения движения крупных частиц:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_{rl}}{dz} &= \frac{1}{\beta_{zl}} \left(\frac{\gamma_l \beta_{\varphi l}^2}{r_l} - E_r - \beta_{\varphi l} F_z + \beta_z B_{\varphi} \right); \\ \frac{dP_{\varphi l}}{dz} &= \frac{1}{\beta_{zl}} \left(-\frac{\gamma_l \beta_{rl} \beta_{\varphi l}}{r_l} - \beta_z F_r + \beta_r F_z \right); \frac{dP_{zl}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}} (-E_z - \beta_{rl} B_{\varphi} + \beta_{\varphi l} F_r); \\ \frac{dr_l}{dz} &= \frac{\beta_{rl}}{\beta_{zl}}; \quad \frac{d\theta_l}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}}; \quad \bar{P}_l = \gamma_l \bar{\beta}_l; \quad \gamma_l = \frac{1}{\sqrt{1 - \bar{\beta}_l^2}} = \sqrt{1 + P_{rl}^2 + P_{\varphi l}^2 + P_{zl}^2} \end{aligned} \right. \quad (2.2)$$

$$W\theta_l(0) = \frac{2\pi}{N}(l - 0.5); \quad l = 1 \dots N; \quad \beta_l(0) = \beta_0; \quad r_l(0) = r_0.$$

Выражения E_r , E_z , B_{φ} через \dot{A}_{mi} , \dot{C}_{mi} , \dot{V}_{mi} приведены в диссертации.

Магнитоэстатическое фокусирующее поле

$$\left\{ \begin{aligned} F_r &\cong -\frac{1}{2} r F_0'(z) + \frac{1}{16} r^3 F_0''(z); \\ F_z &\cong F_0(z) - \frac{1}{4} r^2 F_0''(z); \quad F_0 = \frac{B_0'(z)e}{m_0 \omega_0}; \end{aligned} \right. \quad (2.3)$$

$B_0'(z)$ - распределение z -составляющей индукции магнитного поля вдоль оси.

Граничные условия для амплитуд распространяющихся E_{oi} - волн:

$$\left\{ \begin{aligned} W \cdot \dot{A}_{mi}(0) + jk_{oi}^e \cdot \dot{V}_{mi}(0) &= jk_{oi}^e W \cdot 2\dot{e}_{0mi}^+, \\ -W \cdot \dot{A}_{mi}(L) + jk_{oi}^e \cdot \dot{V}_{mi}(L) &= jk_{oi}^e W \cdot 2\dot{e}_{Lmi}^-, \quad k_{oi}^- = \sqrt{1 - (v_{oi}/b)^2}. \end{aligned} \right. \quad (2.4)$$

Граничные условия для амплитуд закритических E_{oi} - волн имеют вид:

$$W\dot{A}_{mi}(0) + k_{oi}^e \cdot \dot{V}_{mi}(0) = 0; \quad -W\dot{A}_{mi}(L) + k_{oi}^e \cdot \dot{V}_{mi}(L) = 0. \quad (2.5)$$

Эффективность взаимодействия оценивается величиной волнового КПД:

$$\eta_{vmi} = \frac{\text{Im}(\dot{A}_{mi}(z)\dot{V}_{mi}^*(z)) - \text{Im}(\dot{A}_{mi}(0)\dot{V}_{mi}^*(0))}{(\gamma_0 - 1)G_0/e_{oi}}. \quad (2.6)$$

Электронный КПД рассчитывается следующим образом:

$$\eta_e = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \frac{\gamma_0 - \gamma_l(z)}{\gamma_0 - 1}; \quad \gamma_0 = 1/\sqrt{1 - \bar{\beta}_0^2}.$$

Профиль нерегулярного гофрированного волновода задается как

$$b(T) = b_0 + h_v(T) \cdot \sin^2[n_v \pi(T + D_v(T))]; \quad (2.7)$$

$T = (z - z_0)/L_v$, z_0, L_v - начало и длина нерегулярного участка, n_v - количество периодов, $h_v(T)$ - глубина гофра, $D_v(T)$ - функция, задающая изменение периода, $D_v(0) = 0$, $D_v(1) = 0$, при $D_v(T) = 0$ - период постоянный и равен в принятых единицах $d = k_0 L_v / n_v$.

Третья глава содержит результаты оптимизации профилей электродинамических систем черенковских усилителей и генераторов и исследование особенностей оптимальных процессов взаимодействия.

Для решения краевой задачи для системы дифференциальных уравнений – уравнений возбуждения в работе предложен универсальный устойчивый алгоритм на основе использования метода блочной матричной прогонки [1-А, 3-А].

Расчеты частично оптимизированных (оптимизировался профиль $h(\Gamma)$ при $D(\Gamma)=0$) одномодовых ($m_p=1$) нерегулярных релятивистских ЛБВ-0, выполненные с учетом достаточного числа закритических мод показали, что в них реализуются характерные для оптимальных режимов ЛБВ-0 механизмы с максимальным КПД до 65%.

В результате расчетов было обнаружено, что несмотря на полное согласование на выходном конце и значительную удаленность от π границы, при определенных условиях на входном конце лампы существует встречный поток мощности сопоставимый и даже больший, чем попутный. Это указывает на возможность режимов генерации за счет внутренней обратной связи.

Для выяснения физических особенностей многомодовых периодических структур с глубокой гофрировкой были выполнены детальные расчеты дисперсионных характеристик двух и трехмодового периодического волновода при $b_0=9,5$ (трехмодовый), $b_0=6$ (двухмодовый), $d=0,5-3; 1 \leq h \leq 1,4$.

Расчеты показывают, что при выборе периода d и глубины h гофра попадающих в область, соответствующую замедлению основной волны, возможна генерация и усиление при соответствующем выборе рассинхронизма $(0 < \frac{\beta_0 - \beta_{\phi 0}}{\beta_0} < 0.2)$ и начальных амплитуд распространяющихся волн $(\dot{e}_{01}, \dot{e}_{02}, \dot{e}_{03})$.

Были оптимизированы варианты двух и трехмодовых ЛБВ с $n_v=30, I_0=1000A$ [1-А]. В одной из двухмодовых ЛБВ с оптимизированным профилем глубины гофра, был получен расчетный КПД 68%. Также были получены следующие варианты генераторов [3-А, 12-А, 13-А]: 1). Вариант 4-х миллиметрового одноволнового генератора (КПД составил 10%), 2). Вариант 8-ми миллиметрового одноволнового генератора (КПД составил 36%), 3). Вариант 3-х сантиметрового двухволнового генератора (КПД составил 30%).

Ниже приведены два оптимизированных варианта (не оптимизировалось распределение периода гофра), для каждого из которых приведены: функция группировки G_r , - верхняя кривая (2), КПД η - нижняя кривая (1) и профиль гофра b - кривая (3) [7-А, 8-А, 10-А]. Они отображены на рисунках 3.1, 3.2. В этих вариантах сопротивление связи K , на основной гармонике составляет 8

– 10 Ом. Для варианта 1 (рисунок 3.1) КПД составил 64%. Для варианта 2 (рисунок 3.2) КПД составил 62%.

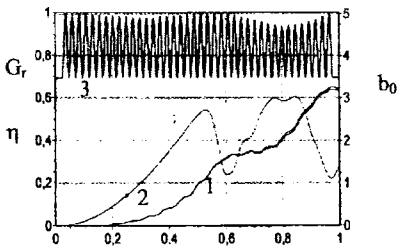


Рисунок 3.1 - Вариант 1

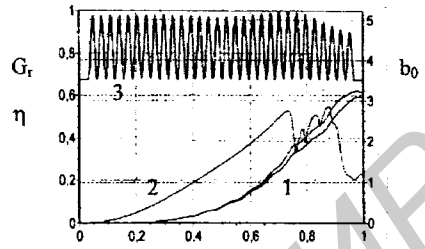


Рисунок 3.2 - Вариант 2

Для выяснения влияния конечной проводимости стенок волновода на основе полной ($S_\sigma \neq 0$) системы самосогласованных уравнений (2.1) выполнены расчеты ранее полученных вариантов при $S_\sigma = 0$. Показано, что в случае медных стенок ($\sigma = 5,6 \cdot 10^7 \text{ см/м}$) для приборов с рабочей частотой $f < 10 \text{ ГГц}$ омические потери не превосходят 1% от выходной мощности, т.е. их влияние оказывается в пределах погрешности расчетов. При $f = 100 \text{ ГГц}$ омические потери достигают 4%.

С помощью расчетов методом сеток для двух конфигураций периодического волновода получена структура линий уровня функции $\text{real}[r\hat{B}_\varphi(r, z)]$. Было показано, что периодичность распределения как $r\hat{B}_\varphi$, так и \hat{E}_z в периодической гофрированной секции, согласованной на выходе, отсутствует [3-А].

На основе двумерной теории установлена области значений величины магнитного поля, при которых наблюдается срыв генерации в черенковских генераторах с замедляющей системой в виде отрезка полого гофрированного волновода при реализации ЛОВ-О и ЛБВ-О механизмов взаимодействия [4-А, 11-А].

В четвертой главе на основе общей теории нерегулярных волноводов представлена математическая модель произвольно нерегулярного рупора на модах E_{0i} . [2-А, 9-А]. На рисунке 4.1 представлен оптимизированный профиль выходного рупора, обеспечивающий наилучшую диаграмму направленности излучения. На рисунке 4.1а представлены профиль рупора $b(z)$ - кривая 1 и распределение амплитуд мод: кривая 2 - E_{01} , кривая 3 - E_{02} , кривая 4 - E_{03} , кривая 5 - E_{04} . На рисунке 4.1б представлена диаграмма направленности $G(\vartheta)$: G - коэффициент направленного действия, ϑ - радиальный угол.

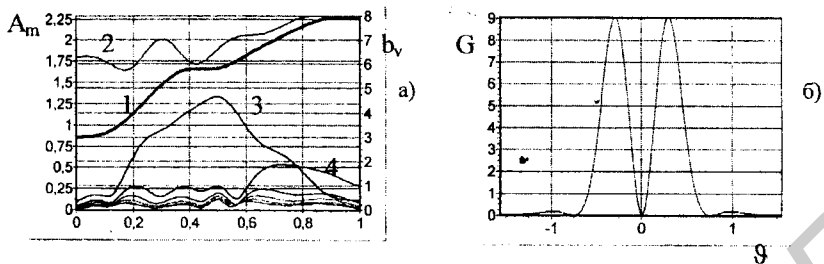


Рисунок 4.1 – Изменение вдоль рупора амплитуд возбуждаемых волн и диаграмма направленности

Сформулирована математическая модель фильтров на волне E_{0i} гофрированного волновода с учетом закритических волн. С использованием этой модели были синтезированы оптимальные профили фильтров.

В приложении приведены описание разработанной программы, 2 акта внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе метода преобразования координат Стрэттона-Свешникова уравнения Максвелла сформулированы в неортогональной координатной системе, в которой граница внутренней поверхности произвольно-нерегулярного полого волновода отображается на регулярный цилиндр единичного радиуса. В новой системе координат на основе проекционного метода Галеркина-Канторовича получена система обыкновенных дифференциальных уравнений для амплитуд связанных волн в нерегулярном волноводе, возбуждаемом произвольной системой источников в приближении идеально проводящих стенок волновода. Уравнения возбуждения обобщены на случай конечной проводимости стенок волновода [1-A, 3-A, 7-A].

2. Получены двумерные самосогласованные нелинейные уравнения черенковских усилителей и генераторов на E_{0i} модах в общем случае – с учетом неоднородного направляющего магнитостатического поля, потерь в стенках электродинамической системы, динамического расслоения электронного потока, полей закритических мод. Введены безразмерные переменные и параметры, приводящие уравнения к универсальной (независимой от частотного диапазона) форме. Сформулированы двухточечные граничные условия для амплитуд распространяющихся и закритических E_{0i} волн на регулярных отрезках волновода. Определены безразмерные функции группировки электронов, волновой и электронный

КПД. Определены через безразмерные переменные мощности прямой и встречной волн в сечениях, где $db/dz = 0$ [1-А, 3-А, 7-А].

3. Предложена оригинальная методика решения краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений на основе метода блочной матричной прогонки. Благодаря этому методу возможно устойчивое решение задачи при учете закритических волн. Следует указать на важное преимущество используемого метода перед сеточными. Оно не только в том, что трехмерная задача сводится к одномерной (двухточечной), что, конечно, тоже существенный фактор, улучшающий вычислительную процедуру. Более важна другая сторона: в многоволновых режимах граничные условия типа условий излучения на концах отрезка нерегулярного волновода заранее не определены и к тому же различны в разных точках поперечного сечения, что затрудняет применение сеточных методов. В проекционных же методах, где волны разделены, такой проблемы не существует. К тому же на основе сеточных методов весьма затруднительно решить задачу возбуждения волновода в самосогласованной теории ЛБВ [1-А, 3-А].

4. Создан комплекс программ вычислительного эксперимента, позволяющий выполнять расчет и оптимизацию параметров генератора начиная от катода до выходного рупора. Выполнены расчеты параметров канавки, при которых она отражает рабочую E_{0i} – волну черенковского генератора. Развита методика расчета дисперсионных характеристик периодической замедляющей системы, позволяющая находить параметры h_n , d_n при которых в спектре пространственных гармоник возбуждаемого электромагнитного поля присутствуют гармоники, имеющие фазовую скорость, равную средней скорости электронного потока при заданном ускоряющем напряжении. Это позволяет заранее предсказывать возможные начальные для последующей оптимизации параметры замедляющей системы черенковского генератора [1-А, 3-А, 4-А, 7-А, 8-А, 10-А, 12-А, 13-А, 14-А].

5. Обращено внимание на отсутствие условий периодичности второго рода («условий Флоке») в поле согласованного отрезка периодического нерегулярного волновода, что указывает на ошибочность ряда работ по теории ЛБВ и ЛОВ, основанных на концепции пространственных гармоник поля периодической замедляющей системы [3-А].

6. Найдены наиболее перспективные варианты конструкций, использующие одно, двух и трех модовое взаимодействие для различных диапазонов длин волн – от 0,4см до 5см с достижимым КПД от 10 до 70%. Выявлены пути достижения необходимых для реализации систем электромагнитного поражения параметров СВЧ импульсов в экспериментальных макетах [1-А, 3-А, 4-А, 7-А, 8-А, 10-А, 12-А, 14-А].

7. Показано, что в случае медных стенок электродинамической системы ($\sigma = 5,6 \cdot 10^7 \text{ см/м}$) для приборов с рабочей частотой $f < 10 \text{ ГГц}$ омические потери не превосходят 1% от выходной мощности. При $f = 100 \text{ ГГц}$ они достигают 4% [1-А, 7-А].

8. Найдены области значений величины сопровождающего магнитного поля, благоприятные для реализации рассмотренных вариантов

черенковского генератора. При малых значениях $F_0 < 0.7$ срыв генерации объясняется недостаточным фокусирующим действием магнитного поля. В диапазоне $0.7 < F_0 < 1.5$ наблюдается эффективная генерация сигнала при черенковском взаимодействии электронов с электромагнитной волной. В области значений $1.5 < F_0 < 3.5$ имеется срыв генерации, который объясняется тем, что в этой области создаются благоприятные условия гирорезонансного взаимодействия с одной из пространственных гармоник [4-А, 11-А].

9. На основе общей теории нерегулярных волноводов математически и физически строго обоснована математическая модель произвольно нерегулярного рупора на модах E_{0i} . Сформулированы граничные условия и поставлена задача оптимизации профиля рупора по характеристике направленности его излучения. В одночастотном приближении (что соответствует условию работы рупора как выходного устройства сверхмощного релятивистского генератора) найдены оптимальные профили рупора, обеспечивающие диаграммы направленности с минимальной шириной основных лепестков и минимальными боковыми лепестками при максимальном коэффициенте усиления. Впервые показано, что присутствие высших мод на раскрыве рупора в оптимальном (по амплитудам и фазам) сочетании с основной может улучшать диаграмму направленности рупора [2-А, 9-А].

10. Сформулирована математическая модель фильтров на волне E_{0i} гофрированного волновода с учетом закритических волн. С использованием этой модели были синтезированы оптимальные профили фильтров. Показано, что за счет неучета закритических волн ошибка может достигать 2-50%. Также показано, что их неучет приводит к значительному занижению коэффициента затухания (до 30%) при глубокой гофрировке ($h > 1,2$), хотя качественная картина, предсказанная по одномодовой модели сохраняется [5-А, 6-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Созданные математические модели и программы оптимизации расширяют исследовательский комплекс для поиска и отбора перспективных конструкций вакуумной СВЧ электроники на основе вычислительного эксперимента. Особое значение имеют программы оптимизации сверхмощных источников СВЧ - колебаний – черенковских приборов по двум причинам: 1) разработка весьма дорогостоящих и сложных приборов этого типа невозможна без компьютерной оптимизации конструкции с обеспеченной достоверностью результатов; 2) сверхмощные черенковские приборы являются основой создания чрезвычайно перспективных систем ПРО и ПВО нового поколения, основанных на радиопоражении управляющих систем ВТО сверхмощными электромагнитными импульсами.

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы в научных и производственных организациях, занимающихся разработкой электронных приборов и устройств СВЧ, а также антенных систем, в которых используются нерегулярные волноводы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи

1-А. Оптимизация релятивистских черенковских генераторов на нерегулярных гофрированных волноводах с учетом закритических мод / М.П. Батура, А. А. Кураев, И.В. Лущицкая, А.К. Синицын // Доклады БГУИР. - 2004. - №4(8). - С.26-36.

2-А. Лущицкая, И.В. Оптимизация профиля рупора кругового сечения возбуждаемого E_{01} -волной / И.В. Лущицкая // Доклады БГУИР. - 2006. - №2.- С.85-93.

3-А. Кураев, А.А. Сверхмощные ЛБВ и ЛОВ на нерегулярных волноводах / А. А.Кураев, И.В.Лущицкая, А.К.Синицын // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. - 2006. -№3. – С.96-104.

4-А. Черенковские генераторы сверхвысокой мощности для комплексов ПРО и ПВО нового поколения / М.П. Батура, А.А.Кураев, И.В. Лущицкая, А.К. Синицын // Новости науки и технологий. - 2007. - №2(6). – С.3-6.

Материалы международных конференций

5-А. Кураев, А.А. Исследование фильтра для E_{01} волны на основе отрезка круглого гофрированного волновода / А. А. Кураев, И.В. Лущицкая, А.К. Синицын // Известия Белорусской инженерной академии: материалы науч.-техн. конф. "Современные информационные технологии". - Минск, 2003 г. - № 1(15)/1. - С.158-161.

6-А. Кураев, А. А. Расчет фильтра E_{01} -волны на отрезке гофрированного волновода / А. А. Кураев, И.В. Лущицкая, А.К. Синицын // Труды 14-й международной крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". - Севастополь, 11-15 сентября 2004 г. – С.474-475.

7-А. Кураев, А. А. Оптимальные релятивистские ЛБВ-0 на нерегулярном гофрированном волноводе / А. А. Кураев, И.В. Лущицкая, А.К. Синицын // Известия Белорусской инженерной академии: материалы науч.-техн. конф. "Современные информационные технологии". – Минск, 2004 г.- №1(17)/2. - С.103-105.

8-А. Kurayev, A.A. Optimized by efficiency single mode relativistic TWT-O with cut-off modes account / A.A. Kurayev, I.V.Lushchitskaya, A.K. Sinityn // 6-

th IEEE International Vacuum Electronics Conference. Proceedings. - Netherlands, 2005. - P.383-384.

9-A. Kurayev, A.A. Optimization of the profile of output horn of relativistic cherenkov generator on the wave E_{01} / A.A. Kurayev, I.V.Lushchytskaya, A.K. Sinitsyn // 6-th IEEE International Vacuum Electronics Conference. Proceedings. - Netherlands, 2005. - P. 393-394.

10-A. Kurayev, A.A. Optimized multi-modes cherenkov relativistic generators on irregular goffered waveguides / A.A. Kurayev, I.V.Lushchytskaya, A.K. Sinitsyn // 6-th IEEE International Vacuum Electronics Conference. Proceedings. - Netherlands, 2005. - P. 433-434.

11-A. Кураев, А. А. Двумерные эффекты в черенковских генераторах на гофрированном волноводе / А. А. Кураев, И.В. Лущицкая, А.К. Сеницын // Труды 16-й международной крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь, 11-15 сентября 2006 г. – С.241-242.

12-A. Батура, М.П. Моделирование и оптимизация параметров черенковских генераторов сверхвысокой мощности / М.П. Батура, А. А. Кураев, И.В. Лущицкая, А.К. Сеницын // Труды 17-й международной крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь, 11-15 сентября 2007 г. – С.613-614.

13-A. Кураев, А. А. Двухкаскадный релятивистский клистрон-генератор / А. А. Кураев, И.В. Лущицкая, А.К. Сеницын // Труды 17-й международной крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". – Севастополь, 11-15 сентября 2007 г. – С.169-170.

14-A. Батура М. П. Черенковские генераторы сверхвысокой мощности для комплексов ПРО и ПВО нового поколения / М.П. Батура, А. А. Кураев, И.В. Лущицкая, А.К. Сеницын // 3-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. – Минск, 23-24 мая 2007 г. - С.23-24.

Sub-

Лушчыцкая Ірына Уладзіміраўна

**АПТЫМІЗАЦЫЯ ПРОФІЛЮ ЭЛЕКТРАДЫНАМІЧНЫХ СІСТЭМ
РЭЛЯТЫВІСЦКІХ ЧАРАНКОЎСКІХ УЗМАЦНЯЛЬНІКАЎ І
ГЕНЕРАТАРАЎ**

Ключавыя словы: нерэгулярны хвалявод, генератар, сіметрычныя электрычныя моды, двухкропкаявая гранічная задача, закрытычныя моды, аптымізацыя профілю, хваляводны пераход, хваляводны фільтр, рупарны выпраменьвальнік.

Аб’ект даследвання: звышмагутныя чаранкоўскія генератары і ўзмацняльнікі на нерэгулярных хваляводах з рабочымі тыпамі хваляў E_{0i} .

Прадмет даследвання: двухмерныя матэматычныя мадэлі названых прыбораў і аптымізацыя профіляў электрадынамічных сістэм прыбораў.

Мэта работы: распрацоўка адэкватнай матэматычнай мадэлі і колькасная аптымізацыя па ККД звышмагутных рэлятывісцкіх шмагхвалеваў чаранкоўскіх генератараў і ўзмацняльнікаў на гафрыраваных хваляводах (уключаючы аптымізацыю профілю электрадынамічнай сістэмы, катоднага адбівальнага фільтра і выхаднога рупарнага выпраменьвальніка), устанавленне з дапамогай метадаў вылічальнага эксперыменту фізічных законамернасцяў аптымальных па эфектыўнасці рэжымаў узаемадзеяння электроннага патоку з электрамагнітным полем.

Метады даследвання: метады пераўтварэння каардынат у зыходнай краявой задачы, праекцыйны метады Кантаровіча-Галеркіна, метады блочнай матрычнай прагонкі для рашэння двухкропкавай краявой задачы, метады Гауса рашэння СЛАУ, метады мінімізацыі Гольфарба.

Вынікі даследвання: ураўненні ўзбуджэння адвольна нерэгулярнага хвалявода з улікам страт у сценках хвалявода, двухмерныя нелінейныя мадэлі рэлятывісцкіх чаранкоўскіх генератараў і ўзмацняльнікаў, доказацельства таго, што ў перыядычных хваляводах, узгодненых на адным з канцоў, звязаныя E_{0i} хвалі не адпавядаюць умове перыядычнасці другога роду, устанавленне магчымасці істотнага паляпшэння дыяграмы накіраванасці пры адначасовым скарачэнні аптымальнай даўжыні рупара, шырокае кола знойдзеных аптымальных варыянтаў чаранкоўскіх ўзмацняльнікаў і генератараў, фільтраў і рупарных выпраменьвальнікаў на E_{0i} хвалях. Вынікі, атрыманыя ў рабоце, могуць быць выкарыстаны ў навуковых арганізацыях, якія займаюцца пытаннямі разліку і канструявання вакуумных электронных ЗВЧ прыбораў высокай магутнасці і хваляводных устройстваў на адрэзках нерэгулярных хваляводаў.

Лушицкая Ирина Владимировна

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧЕРЕНКОВСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ И
ГЕНЕРАТОРОВ**

Ключевые слова: нерегулярный волновод, генератор, симметричные электрические моды, двухточечная граничная задача, закритические моды, оптимизация профиля, волноводный переход, волноводный фильтр, рупорный излучатель.

Объект исследования: сверхмощные черенковские генераторы и усилители на нерегулярных волноводах с рабочими типами волн E_{0i} .

Предмет исследования: двумерные математические модели указанных приборов и оптимизация профилей электродинамических систем приборов.

Цель работы: разработка адекватной математической модели и численная оптимизация по КПД сверхмощных релятивистских многоволновых черенковских генераторов и усилителей на гофрированных волноводах (включая оптимизацию профиля электродинамической системы, катодного отражающего фильтра и выходного рупорного излучателя), установление с помощью методов вычислительного эксперимента физических закономерностей оптимальных по эффективности режимов взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем.

Методы исследования: метод преобразования координат в исходной краевой задаче, проекционный метод Канторовича-Галеркина, метод блочной матричной прогонки для решения двухточечной краевой задачи, метод Гаусса решения СЛАУ, метод минимизации Гольдфарба.

Полученные результаты: уравнения возбуждения произвольно нерегулярного волновода с учетом потерь в стенках волновода, двумерные нелинейные модели релятивистских черенковских генераторов и усилителей, доказательство того, что в периодических волноводах, согласованных на одном из концов, связанные E_{0i} волны не удовлетворяют условию периодичности второго рода, установление возможности существенного улучшения диаграммы направленности при одновременном сокращении оптимальной длины рупора, широкий круг найденных оптимальных вариантов черенковских усилителей и генераторов, фильтров и рупорных излучателей на E_{0i} волнах. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы в научных организациях, занимающихся вопросами расчета и конструирования вакуумных электронных СВЧ приборов высокой мощности и волноводных устройств на отрезках нерегулярных волнопроводов.

SUMMARY

Lushchyskaya Irina Vladimirovna

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE OF ELECTRODYNAMIC SYSTEMS RELATIVISTIC CHERENKOV AMPLIFIERS AND GENERATORS

Key words: arbitrary-irregular waveguides, generator, symmetrical electric modes, two-point boundary task, cut-off modes, profile optimization, waveguide transition, waveguide filter, horn radiator.

Object of research: super-power cherenkov generators and amplifiers on irregular wave guides with working types of waves E_{0i} .

Subject of research: bidimensional mathematical models of the specified devices and optimization of structures of electrodynamic systems of devices.

Primary purpose of research: development of adequate mathematical model and numerical optimization on efficiency super-power relativistic multiwave cherenkov generators and amplifiers on gofferred waveguides (including optimization of a structure of electrodynamic system, the cathodic reflecting filter and horn radiator), an establishment with the help of methods of computing experiment of physical laws optimum on efficiency of modes of interaction of an electronic stream with an electromagnetic field.

Research methods: coordinate transformation method for the initial boundary task, Kantorovich - Galerkin projective method, method of block matrix prorate for the decision of a point-to-point regional task, Gauss method of the decision of slough, Goldfarb minimization method.

The following results are obtained: the equations of excitation of any way irregular waveguide in view of losses in walls of a wave guide, bidimensional nonlinear models relativistic cherenkov generators and amplifiers, it is proved, that in the periodic waveguides coordinated on one the ends, connected E_{0i} waves do not satisfy to a condition of periodicity of the second sort, an establishment opportunity substantial improvement of the diagram of an orientation at simultaneous reduction of optimum length of a megaphone, the broad audience of the found optimum variants cherenkov amplifiers and generators, filters and horn radiators on E_{0i} waves.

The results obtained in the work can be used in the research establishments which deal with problems of calculation and design of vacuum electron UHF-devices of high power and devices on the intervals of irregular waveguides.

Лущицкая Ирина Владимировна

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧЕРЕНКОВСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ И
ГЕНЕРАТОРОВ**

Специальность 01.04.03 – “Радиофизика”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 23.01.2008.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,16.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 60 экз.	Заказ 57.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004
220013, Минск, П. Бровки, 6.