

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.385.6

МАТВЕЕНКО
Владимир Владимирович

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО КПД ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СПИРАЛЕВИДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ В ГЕНЕРАТОРАХ,
УСИЛИТЕЛЯХ И УМНОЖИТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Минск 2015

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

Научный руководитель

Синицын Анатолий Константинович,

доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Гринчик Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отделения теплофизики государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси

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

Оппонирующая организация Белорусский государственный университет

Защита состоится « 11 » июня 2015 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»

Автореферат разослан « 4 » мая 2015 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
канд. физ.-мат. наук, доцент

Т.Л. Попкова

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Вакуумная СВЧ-электроника остается основой современных систем связи, радиолокации, телеметрии, радионавигации, телевидения, радиоастрономии, радиоспектроскопии, технологических процессов обработки материалов. Изначально развитие техники СВЧ идет в направлении создания разнообразных приборов все большей мощности и работающих на более высоких частотах. В этом направлении наиболее конкурентными оказались гирорезонансные приборы, основанные на взаимодействии винтовых электронных потоков с незамедленными волнами. К этому типу приборов относятся гиротрон, пениотрон, гиротон, гирокон.

Основным недостатком гиротрона на высоких частотах является необходимость большой величины индукции направляющего магнитостатического поля, обеспечивающего условия орбитальной группировки поливинтового пучка с быстрой H -волной в области взаимодействия, что требует использования криогенных систем даже при работе на второй гармонике. Уменьшить величину фокусирующего поля можно, если в гиротроне в качестве рабочей использовать замедленную E -волну. В диссертации исследована такая возможность.

Пениотрон привлекает внимание исследователей как потенциально идеально эффективный усилитель или генератор, в котором реализован механизм дрейфовой фазировки электронов винтового пучка с азимутально неоднородным полем волны. При таком механизме все электроны в среднем отдают энергию одинаково, независимо от начальной фазы влета, и теоретически даже на высоких (вплоть до 10-й) гармониках (КПД достигает 100 %). Однако в реальных условиях ввиду наличия различных факторов, таких, как поле заряда, величина фазовой скорости, встречная волна в резонаторе, релятивизм, идеальный механизм частично разрушается. Влияние этих факторов на эффективность пениотрона исследуется в диссертации.

Гирокон и гиротон так же, как и пениотрон относятся к классу потенциально идеально эффективных усилителей и генераторов. Они используют круговую развертку предварительно прямолинейного «тонкого» релятивистского электронного пучка и отбор энергии во вращающихся полях цилиндрических резонаторов. Ввиду конгруэнтности траекторий электронов в этих приборах теоретически достижим электронный КПД 100 %.

В гиротоне-генераторе используется обнаруженный А.А. Кураевым и С.В. Колосовым эффект генерации прямолинейного релятивистского пучка в стоячих вращающихся электромагнитных полях большой амплитуды. Однако для использования данного эффекта в конструкциях реальных приборов необходимо установить наиболее благоприятные зоны генерации различных типов стоячих вращающихся мод резонатора. В диссертации впервые выполнено та-

кое детальное исследование зон генерации различных E - и H - мод и на этой основе предложены перспективные конструкции генераторов на комбинированной $E+H$ -мод с КПД, близким к 100 %.

«Умножители частоты» – приборы в вакуумной СВЧ-электронике, основанные на возможности конструировать эффективные источники излучения на высоких частотах $n\omega$ при управлении низкочастотным сигналом ω от генератора небольшой мощности. Эффективность классических умножителей на основе клистрона резко понижается с увеличением коэффициента умножения. Ранее А.А. Кураевым была предложена идея потенциально идеально эффективного умножения частоты в гироконе и гиротоне. Основное преимущество этого механизма умножения состоит в том, что в силу отсутствия продольной группировки в нем реализуется близкий к идеальному по эффективности механизм умножения – все электроны достаточно тонкого пучка независимо от фазы влета в модулятор находятся в одинаковых условиях отдачи энергии и при правильной настройке и отсутствии потерь электронный КПД приближается к 100 %. В диссертации выполнен детальный расчет с учетом омических потерь и найдены перспективные варианты 2ω , 3ω , 4ω умножителей.

Установленные выше проблемы и определяют направления исследований данной диссертации: проведение оптимизационных расчетов по выявлению возможностей гиротрона на замедленной волне; установление факторов, приводящих к ухудшению идеального пениотронного механизма; нахождение условий, при которых реализуется максимальный КПД в гиротоне-генераторе; нахождение предельных характеристик умножения частоты в приборах с круговой модуляцией релятивистского электронного пучка.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа была выполнена в соответствии с темой одного из научных направлений БГУИР – «Методы моделирования и оптимизации в радиоэлектронных системах и устройствах».

Результаты диссертационной работы использованы в госбюджетной НИР, выполнявшейся на кафедре «ВМ и П» в период с 2011 по 2014 г:

НИР № ГБ 11-2035 «Моделирование и оптимизация параметров приборов и устройств».

Цель и задачи исследования

Целью работы является создание на основе адекватных математических моделей нелинейной теории взаимодействия непрямолинейных электронных

потоков с электромагнитными полями цилиндрических гладкостенных и гофрированных волноводов и изучение на основе этой теории оптимальных по КПД процессов в пениотронах, гиротонах, гиротронах сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Сформулировать нелинейную математическую модель процессов усиления и генерации в гиротроне на замедленной E_{0i} моде гофрированного волновода и найти оптимальные выходные характеристики по КПД и усилению.

2. Сформулировать математическую модель взаимодействия в пениотроне на быстрых волнах H и T с учетом факторов, влияющих на эффективность пениотрона: фазовой скорости парциальной волны, азимутального индекса n рабочей H_{n1} -моды цилиндрического резонатора и влияния встречной парциальной волны, не учтенных в существующих моделях, и установить степень влияния этих факторов.

3. Установить критичность оптимальных режимов взаимодействия в гиротроне на основе неусредненных уравнений движения электрона во вращающихся E_{11l} -, H_{11l} - и $E_{110}+H_{11l}$ -модах.

4. Составить математическую модель гироконов – умножителей на рабочей волне E_{n10} и найти оптимальные параметры конструкций и режимов для достижения максимальной эффективности.

5. Сформулировать и обосновать математическую модель и найти оптимальные параметры конструкции и режима работы для реализации высокоэффективных гиротонов-умножителей на волне H_{n1n} .

Научная новизна

Доказательство возможности генерации и усиления в гиротроне и гироЛБВ на E_{0i} -моде гофрированного волновода, в которых обеспечивается снижение требуемой индукции магнитостатического резонансного поля вдвое по сравнению с обычным гиротроном на H -волне при не худших выходных характеристиках.

Результаты компьютерного моделирования пениотронов на H - и T -волнах, в которых показано резкое снижение эффективности генераторов пениотронов из-за влияния встречной волны, причем, пениотрон-генератор на H_{n1m} -моде обеспечивает лучшие выходные параметры, чем на T_{n1m} -моде.

Результаты сравнения эффективности гиротонов-генераторов, основанные на взаимодействии прямолинейного РЭП с вращающимися электромагнитными полями и выявившие, что наилучшим КПД при относительно небольших входных значениях питч-фактора является комбинированный тип колебаний

$E_{110}+H_{11l}$. Оптимальные параметры гиротона-генератора на вращающихся E_{11l} -, H_{11l} - и гибридной $E_{110}+H_{11l}$ - модах, в которых преобразуется циклотронное излучение и дрейфовая энергия релятивистского электронного потока в мощную вращающуюся электромагнитную волну.

Обоснование на основе вычислительного эксперимента возможности создания новых типов электронных приборов – гирокон- и гиротона-умножителей, в которых достигается $2^x - 4^x$ кратное умножение частоты при одинаковом коэффициенте усиления с КПД, большим 90%.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретическое предсказание возможности генерации и усиления в гиротроне и гиро-ЛБВ на замедленной E_{0i} -моды гофрированного волновода, в которых обеспечивается снижение требуемой резонансной индукции магнитостатического поля вдвое по сравнению с обычным гиротроном на H -волне при тех же выходных характеристиках.

2. Установление путем компьютерного моделирования в пениотронах на H - и T -волнах существенного влияния встречной волны на понижение эффективности пениотронного генератора. Пениотрон-генератор на H_{n1m} -моды с учетом встречной волны обеспечивает реально КПД больше 60 % ($f \sim 2,4$ ГГц) на первой и второй гармониках при нерелятивистских скоростях электронов пучка, что существенно ниже результатов предварительных расчетов пениотрона без учета встречной волны, где КПД оценивался более 90 %.

3. Установлены эффективные схемы гиротонов-генераторов, обеспечивающие за счет использования сочетаний различных вращающихся мод в круглых резонаторах (E_{11l} , H_{11l}) достижение КПД больше 90 %, что существенно превышает КПД прототипа гиротона на E_{110} -моды с КПД 75 %, при рабочей частоте 1,3 ГГц.

4. Установление на основе вычислительного эксперимента возможности создания новых типов электронных приборов – гирокон- и гиротона-умножителей, в которых достигается двух – четырехкратное умножение частоты с резонаторами на H_{n1n} -моды с КПД, большим 90 %, что существенно больше по сравнению с прототипом гиротона-умножителя на E_{210} -моды с КПД 56 %.

Личный вклад соискателя ученой степени

При личном участии автора получены следующие результаты:

- Сформулирована нелинейная самосогласованная математическая модель гиротрона на замедленной E_{0i} -волне гофрированного волновода. С использованием этой модели найдены оптимальные по КПД и усилению

- параметры гиротрона на замедленной волне – принципиально нового эффективного прибора СВЧ (на тип этого прибора получен патент РФ).
- С учетом существенных факторов: величины фазовой скорости парциальных волн H и T и влияния гирорезонанса на встречных волнах, не учитываемых в существующих моделях, сформулирована математическая модель пениотрона на быстрых волнах. На основе этой модели выяснено влияние перечисленных факторов на предельно достижимые КПД пениотронов.
 - На основе неусредненных уравнений установлены факторы критичности оптимальных по КПД режимов гиротона на E_{11l} -, H_{11l} - и $E_{110}+H_{11l}$ -модах.
 - Найдены оптимальные по КПД параметры конструкций и режимов гироконов-умножителей частоты.
 - На основании разработанной автором математической модели найдены оптимальные по эффективности параметры конструкции и режима работы гиротронов-умножителей на колебании H_{n1n} .

Научным руководителем Сеницыным А.К. предложена область и основные направления исследований, осуществлялось общее руководство. Совместно с Сеницыным А.К. проводилось обсуждение способов и методов решения поставленных задач, оценка полученных результатов. Основными соавторами по опубликованным работам являются: профессор Сеницын А.К. и профессор Кураев А.А.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Материалы диссертации докладывались на 21, 22, 24-й Международной Крымской конференции КрыМиКо'2011, КрыМиКо'2012, КрыМиКо'2014, Украина, Севастополь; International Vacuum Electronics Conference XII IEEE 2011, Feb 21–24, Bangalore, India; International Vacuum Electronics Conference XIII IEEE 2012, Apr. 24–26, Monterey, California, USA.

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, из них 6 научных статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 3,1 авторского листа, 11 публикаций в сборниках научных трудов и материалов конференций, 1 патент. Общий объем опубликованных материалов составляет 4,2 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Общий объем диссертационной работы составляет 123 страницы, из них 90 страниц основного текста, 65 рисунков на 51 странице, 13 таблиц на 12 страницах, список использованных источников из 150 наименований, в том числе 18 публикаций соискателя на 2 страницах и 2 приложения на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* сформулирована нелинейная математическая модель процессов усиления и генерации в гиротроне на замедленной E_{0i} -моду. Математическая модель представляет собой самосогласованную задачу о возбуждении нерегулярного волновода электронным пучком, которая описывается уравнениями Максвелла в векторном виде и релятивистскими уравнениями движения электронов пучка. При решении задачи о возбуждении отрезка нерегулярного волновода, каковой является область взаимодействия рассматриваемого прибора, использовался метод, основанный на отображении продольно-нерегулярной внутренней поверхности волновода на регулярный цилиндр единичного радиуса. При таком подходе система самосогласованных уравнений имеет вид

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{B}}^p = jW \hat{g} \dot{\vec{E}}^p + \hat{g} \dot{\vec{\delta}}^p \quad \hat{g} \cdot \operatorname{rot} \dot{\vec{E}}^p = -jW \dot{\vec{B}}^p \quad m_0 \frac{d\gamma \vec{v}_e}{dt} = e \left(\vec{E}' + \frac{1}{c} [\vec{v}_e \vec{B}'] \right),$$

где \hat{g} , \check{g} – ковариантный и контравариантный метрические тензоры; $\vec{B}' = \mu_0 \cdot \vec{H}'$ –

индукция магнитного поля; $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ – релятивистский масс-фактор; \vec{H}' –

вектор напряженности магнитного поля, \vec{E}' – вектор напряженности электрического поля; ϵ_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости; t – время;

$\vec{J} = -\rho_e \vec{v}_e$ – плотность тока; \vec{v}_e – скорости электронов; ρ_e – плотность заряда в

электронном потоке; $\vec{\delta} = \frac{\vec{J}}{\epsilon_0 \omega_0 E_m}$, $E_m = \frac{m_0 \omega_0 c}{e}$; верхний индекс у векторов в

преобразованных уравнениях Максвелла « p » означает «расчетный».

После применения стандартной проекционной процедуры, а также закона сохранения заряда получается самосогласованная система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих *распределение комплексных амплитуд $\dot{A}_r, \dot{V}_i, \dot{C}_i$ и движение крупных частиц*, имитирующих динамику электронного потока.

Уравнения для расчетных амплитуд для азимутально-симметричной E_{0i} -волны:

$$\frac{d\dot{A}_i}{dz} = (W\dot{V}_i + v_{0i}\dot{C}_i) + (1-j)2S_\sigma \frac{\sqrt{1 + (\partial b / \partial z)^2}}{b} \sum_k \dot{V}_k \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})};$$

$$\frac{d\dot{V}_i}{dz} = -W \left\{ \dot{A}_i + \left(\frac{\partial b}{\partial z} \right)^2 \cdot \left[\dot{A}_i \frac{1}{3} \left(1 + \frac{4}{v_{0i}^2} \right) + \sum_{k \neq i} \frac{4 \cdot (v_{0i}^2 + v_{0k}^2)}{(v_{0i}^2 - v_{0k}^2)^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})} \dot{A}_k \right] - \right.$$

$$\left. -b \frac{\partial b}{\partial z} \cdot \left(-\frac{\dot{C}_i}{v_{0i}} + \sum_{k \neq i} \frac{2 \cdot v_{0k}}{v_{0i}^2 - v_{0k}^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})} \dot{C}_k \right) \right\} +$$

$$+ \frac{\sigma_0}{e_{0i} b} \cdot \left(\frac{1}{N_e} \sum_{l=1}^{N_e} J_1 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \left(\frac{\beta_{rl}}{\beta_{zl}} - \frac{r_l}{b} \frac{\partial b}{\partial z} \right) \right) j e^{-jW\theta_i};$$

$$\dot{C}_i = -\frac{v_{0i} \dot{V}_i}{W \cdot b^2} + \frac{\partial b}{b \partial z} \times \left(-\frac{\dot{A}_i}{v_{0i}} + \sum_{k \neq i} \frac{2 \cdot v_{0i}}{v_{0k}^2 - v_{0i}^2} \cdot \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})} \dot{A}_k \right) -$$

$$-\frac{j\sigma_0}{W \cdot e_{0i} \cdot b^2} \cdot \frac{1}{N_e} \sum_{l=1}^{N_e} J_0 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) e^{-jW\theta_i}; \quad i, k = 1 \dots M_s,$$

где \dot{A}_i – безразмерная амплитуда поперечной электрической составляющей волны; \dot{V}_i – безразмерная амплитуда поперечной магнитной составляющей волны; \dot{C}_i – безразмерная амплитуда продольной электрической составляющей волны.

Функции распределения по сечению компонент азимутально-симметричной E_{0i} -волны соответственно имеют вид

$$J_1(v_{0i}\rho)\vec{r}_0, J_1(v_{0i}\rho)\vec{\varphi}_0, J_0(v_{0i}\rho)\vec{z}_0;$$

$\vec{r}_0, \vec{\varphi}_0$ – координатные векторы в поперечном сечении волновода;

J_0, J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядков, $J'_0(x) = -J_1(x)$;

v_{0i} – i -й корень уравнения $J_0(v_{0i}) = 0$;

$$e_{0i} = 0,5 J_1^2(v_{0i}), \quad \sigma_0 = \frac{eI_0}{\pi \varepsilon_0 m_0 c^3}, \quad S_\sigma = \sqrt{\frac{\pi W}{\sigma \lambda_0 \mu_0 c}}$$

σ_0 – нормированное значение тока пучка I_0 ;

σ – проводимость стенки волновода (См/м) для меди $\sigma = 5,6 \cdot 10^7$;

j – мнимая единица;

$b(z), b$ – внутренняя граница профиля, заданная гладкой функцией.

Граничные условия к этой системе ставятся в начальном и конечном сечении отрезка нерегулярного волновода (двухточечная задача):

$$W \cdot \dot{A}_i(0) + jk_{0i}^e \cdot \dot{V}_i(0) = jk_{0i}^e W \cdot 2b(0) \dot{e}_{0i}^+; \quad -W \cdot \dot{A}_i(L) + jk_{Li}^e \cdot \dot{V}_i(L) = jk_{Li}^e W \cdot 2b(L) \dot{e}_{Li}^-.$$

$$k_i^e = \begin{cases} \sqrt{W^2 - (v_{0i}/b)^2}; & \text{если } W > v_{0i}/b - \text{распространяющиеся волны} \\ -j\sqrt{(v_{0i}/b)^2 - W^2}; & \text{если } W < v_{0i}/b - \text{закритические волны.} \end{cases}$$

Уравнения движения крупных частиц:

$$\begin{cases} \frac{d P_{rkl}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zkl}} \left(\frac{\gamma_{kl} \beta_{\varphi kl}^2}{r_{kl}} - E_r - \beta_{\varphi kl} F_z + \beta_{zkl} B_\varphi \right); \\ \frac{d P_{\varphi kl}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zkl}} \left(\frac{\gamma_{kl} \beta_{rkl} \beta_{\varphi kl}}{r_{kl}} - \beta_{zkl} F_r + \beta_{rkl} F_z \right); \\ \frac{d P_{zkl}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zkl}} (-E_z - \beta_{rkl} B_\varphi + \beta_{\varphi kl} F_r); \\ \frac{d r_{kl}}{dz} = \frac{\beta_{rkl}}{\beta_{zkl}}; \quad \frac{d \varphi_{kl}}{dz} = \frac{\beta_{\varphi kl}}{r_{kl} \beta_{zkl}}; \quad \frac{d \theta_{kl}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zkl}}; \end{cases}$$

$$\bar{P}_{kl} = \gamma_{kl} \bar{\beta}_{kl}; \quad \gamma_{kl} = 1 / \sqrt{1 - \bar{\beta}_{kl}^2} = \sqrt{1 + P_{rkl}^2 + P_{\varphi kl}^2 + P_{zkl}^2}.$$

Решение поставленной задачи традиционными методами типа Рунге–Кутты или Хемминга не встречает затруднений, если рассматриваются только распространяющиеся волны. Однако для точного расчета волновода необходим учет наряду с распространяющимися волнами закритических, которые существенно меняют характеристики волновода. В численных расчетах использовалась конечно-разностная неявная схема второго порядка точности.

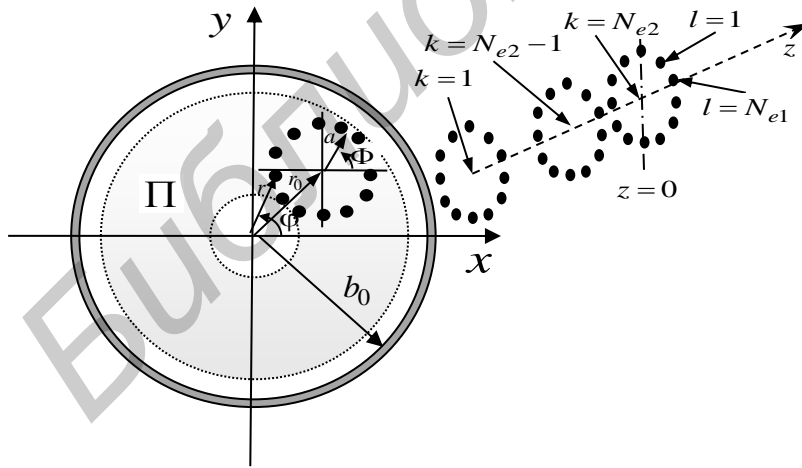


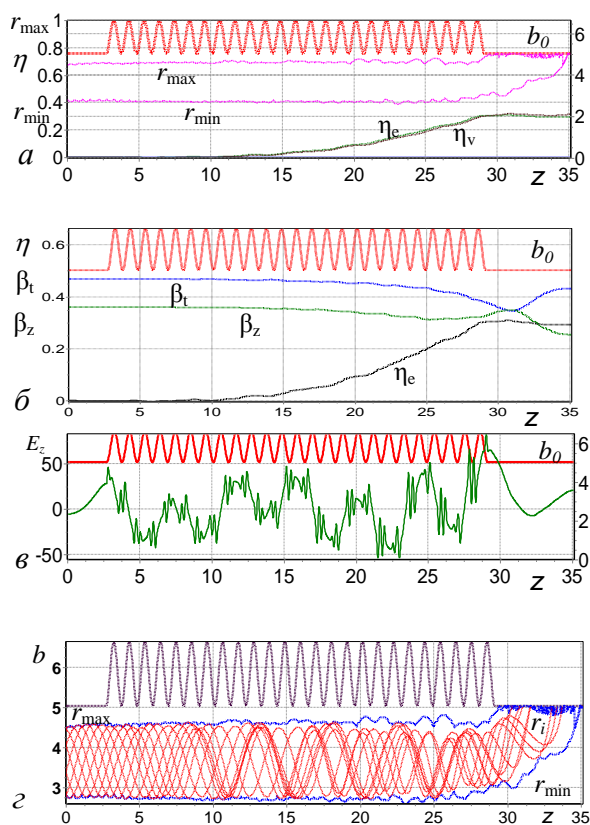
Рисунок 1. – Расстановка электронных частиц на одной ларморовской электронной трубке трубчатого пучка П

Решение поставленной задачи традиционными методами типа Рунге–Кутты или Хемминга не встречает затруднений, если рассматриваются только распространяющиеся волны. Однако для точного расчета волновода необходим учет наряду с распространяющимися волнами закритических, которые существенно меняют характеристики волновода. В численных расчетах использовалась конечно-разностная неявная схема второго порядка точности.

При моделировании гиротрона было использовано 16 электронных орбит, расставленных на периоде, и 8 электронных частиц на каждой орбите, рисунок 1.

Исследование такого устройства указывает на сложный характер взаимодействия. Для выяснения физических особенностей были выполнены расчеты гиротрона в трех режимах: усилитель, генератор, регенеративный усилитель.

Профиль гиротрона и распределение характеристик электронного пучка и



а – η_e , η_v – электронный и волновой КПД, r_{\min} , r_{\max} – граничные значения пучка;

б – β_z и β_t – продольная и поперечная относительные составляющие скорости;

в – E_z – продольная силовая компонента E_{0i} – моды;

г – r_i – электронные траектории, **б** – безразмерный радиус волновода

Рисунок 2. – Характеристики взаимодействия

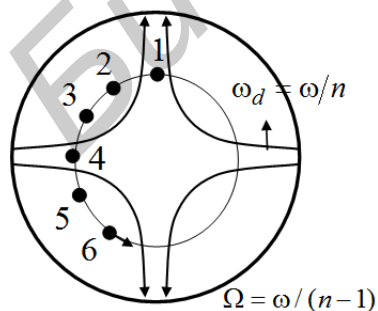


Рисунок 3. – Начальная расстановка частиц

z -компоненты поля вдоль него показаны на рисунке 2. Соотношение между начальными поперечной и продольной скоростью соответствует $q=1,3$; КПД = 30 %; магнитное поле $F=0,65$; ток пучка 201А; выходная мощность 5,6 МВт; $K_u=15$ дБ; $\beta_0=0,531$; тип волны E_{01} .

Во *второй главе* проанализированы процессы взаимодействия на быстрых волнах H или T в пениотроне с учетом фазовой скорости парциальной волны, азимутального индекса n рабочей H_{n1} -моды цилиндрического резонатора и влияния встречной парциальной волны. Самосогласованные уравнения имеют следующий вид:

$$\beta_{zi} \frac{d\gamma_i \vec{\beta}_i}{dT} = -L_0 \left\{ A(\vec{E} + [\vec{\beta}_i \vec{B}]) + [\vec{\beta}_i \vec{F}] \right\};$$

$$\frac{dA}{dT} = \frac{L_0 G}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\vec{\beta}_i \cdot \vec{E}_{re})}{\beta_{zi}}; \quad \frac{d\vec{r}_{\perp i}}{dT} = \frac{L_0 \vec{\beta}_{\perp i}}{\beta_{zi}};$$

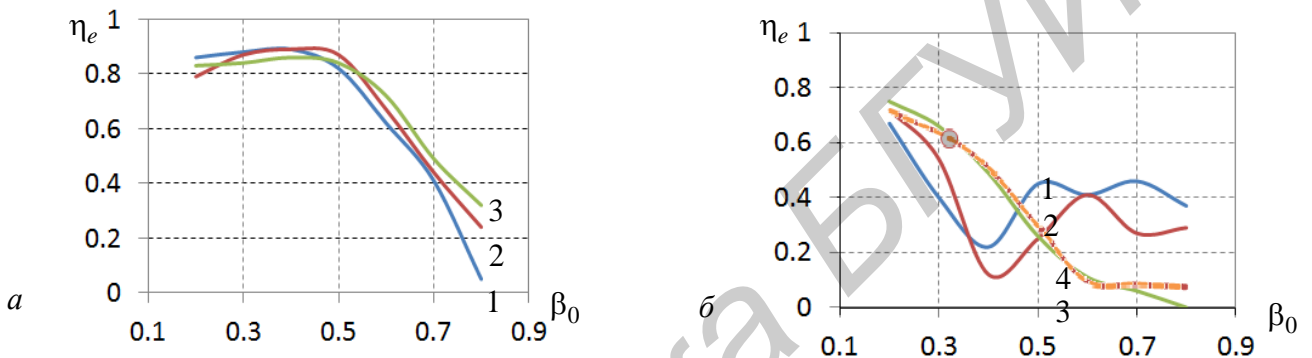
$$\frac{d\vartheta}{dT} = \frac{L_0 G}{A \cdot N} \sum_{i=1}^N \frac{(\vec{\beta}_i \cdot \vec{E}_{im})}{\beta_{zi}}; \quad \frac{d\theta}{dT} = \frac{L_0}{\beta_{zi}};$$

где $T=z/L'$, $0 \leq T \leq 1$, L' – длина области взаимодействия, $L_0=L'\omega/c$; $\vec{F} = e\vec{B}_0/m_0\omega$; $A = eE_m(T)/m_0c\omega$; I_0 – ток пучка, $G = 2e\mu_0 I_0 / m_0 c N_s$ – параметр усиления; $N_s = 2 \text{real} \int_{S_{\perp}} [\dot{\vec{E}}_+^o \cdot \dot{\vec{B}}_+^{o*}] \vec{z}_0 ds_{\perp}$ – норма собственной волны.

В расчетах в соответствии с методом крупных частиц электронный поток моделируется эквивалентными «электронами», равномерно распределенными по периметру (r_0) пучка из условия пениотронного синхронизма, на одном периоде по азимуту лишь для M траекторий частиц (рисунок 3), где $T=0$, $\beta_{ri}=0$, $\beta_{zi}=\beta_{z0}$,

$$\beta_{\psi_i} = \beta_{i0} = q_0 \beta_{z0}, \quad \theta_i = 0, \quad r_i = r_0, \quad \psi_i = 2\pi(i-1/2)/M, \quad r_0 = \frac{p \beta_{i0}}{1 - \beta_{z0}/\beta_p}.$$

Получены результаты расчета предельных КПД пениотронного взаимодействия со стоячей модой резонатора (с учетом встречной волны). Показано, что на первой гармонике циклотронной частоты практически отсутствует влияние величины фазовой скорости на эффективность пениотрона, пока $\beta_0 < 0,7$. При этом, как видно из рисунка 4, а, КПД превышает 80 % для пучка с напряжением < 50 кВ. Однако уже на третьей гармонике наблюдается резкое снижение КПД с ростом скорости пучка, которое объясняется влиянием гирорезонанса со встречной волной (рисунок 4, б).



Кривые 1 – $\beta_p=1.1$; 2 – $\beta_p=1.3$; 3 – $\beta_p=2$; а – $n=2, p=1$; б – $n=4, p=3$

Рисунок 4. – Электронный КПД (η_e) пениотрона с встречной H_{nm1} волной

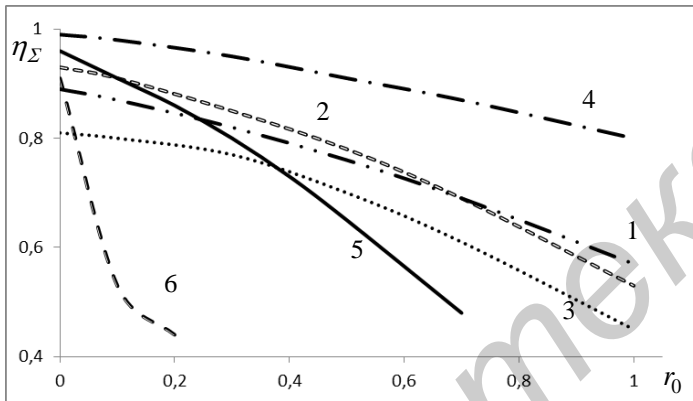
При нерелятивистских скоростях электронов эффективность взаимодействия с H -волной остается высокой (КПД > 80 %) и слабо зависит от величины фазовой скорости. Однако с ростом β_0 , начиная с некоторого его значения, наблюдается спад КПД, тем раньше, чем больше величина фазовой скорости и номер гармоники p . В то же время для взаимодействия с T -волной на первой гармонике величина КПД превосходит 80 % даже при релятивистских скоростях вплоть до $\beta_0=0,8$. Еще одним фактором, приводящим к снижению эффективности резонансного пениотрона, является гирорезонанс со встречной волной стоячей моды резонатора. Это объясняется сильной зависимостью фазовых траекторий электронов от начальной относительной фазы из-за гирорезонансной группировки, что приводит, уже начиная с третьей гармоники, к заметному снижению КПД. Поэтому идеальность пениотронного механизма (когда КПД достигает 90 %) может быть реализована лишь на первой или второй гармонике и низковольтном пучке.

Сравнение пениотрона-генератора на H -волне и на T -волне показало возможности отстройки пениотрона-генератора на H -волне от условия гирорезонанса со встречной волной за счет изменения β_p , что приводит к возможности достижения высоких КПД низкочастотных ($f \sim 2,4$ ГГц) пениотронов-

генераторов на первой и второй гармониках при нерелятивистских скоростях электронов пучка.

Проведено сопоставление с имеющимися экспериментальными данными пениотрона-генератора на второй циклотронной гармонике, полученными группой Токийского университета, что коррелирует с кривой 4 (точка А), рисунок 4 и полностью согласуется с проведенными исследованиями пениотрона на H -волне в диссертации.

В *третьей главе* приведены оптимальные режимы гиротона. Предложена эффективная схема гиротона-генератора, где сразу за первым резонатором с модой E_{11l} без области дрейфа следует цилиндрический резонатор, настроенный на возбуждение одной из мод H_{11l} , E_{11l} , E_{110} или гибридной $H_{11l}+E_{110}$ -моды. Полученные режимы взаимодействия дают возможность создания гиротона-генератора с КПД более 90 % в сантиметровом диапазоне, где наиболее предпочтительным вариантом является использование комбинаций мод



Кривые 1–4 соответствуют вариантам двухкаскадного генератора с модами $H_{11l}, E_{110}, E_{112}, H_{112}+E_{110}$, а кривые 5, 6 вариантам однокаскадного генератора с модами $H_{113}+E_{110}, E_{113}+E_{120}$

Рисунок 5. – Зависимость КПД гиротон-генераторов от поперечного радиуса РЭП на входе

увеличении r_0 до 0,5 и на 20–30 % при увеличении r_0 до 1. В зависимости 4 двухкаскадного генератора с модой $H_{112}+E_{110}$ даже при $r_0 \approx 1$ величина КПД остается на уровне 80%, однако уже при $r_0 \geq 0,6$ наблюдается эффект «рассыпания». Также видно, что в сравнении с двухкаскадным генератором однокаскадный более критичен (кривые 5, 6).

В *четвертой главе* исследованы процессы умножения частоты в гироконах и гиротонах. Для исследования использовалась следующая система безразмерных уравнений траектории электронного пучка:

$$\frac{d\gamma \vec{\beta}}{dz} = -\left\{ A_i \left(\vec{E}_i + [\vec{\beta} \vec{B}_i] \right) + [\vec{\beta} \vec{F}] \right\} / \beta_z; \quad \frac{d\vec{r}_\perp}{dz} = \frac{\vec{\beta}_\perp}{\beta_z}; \quad \frac{d\theta}{dz} = \frac{1}{\beta_z}; \quad \vec{\beta} = \vec{v} / c; \quad 0 < z < L,$$

где $\theta = \omega_0 t$ – угол пролета; $\omega_0 = 2\pi c / \lambda_0$ – частота сигнала; λ_0 – длина волны в открытом пространстве.

Для цилиндрических медных резонаторов омические потери в стенках и максимальная напряженность электрического поля выражаются следующими формулами:

$$P_{\sigma i}^{E_{n10}} [\text{кВт}] = \frac{260 A_i^2}{\sqrt{\lambda_0} [\text{см}]} \frac{J_n'^2(v_{n1})}{v_{n1}^2} R_i^3 (L_i + 2R_i) n^{5/2} \quad - \text{ для гиросконов;}$$

$$P_{\sigma}^{H_{n11}} [\text{кВт}] = \frac{260 A_2^2}{N_n^2 \sqrt{\lambda_0} [\text{см}]} J_n^2(\mu_{n1}) \sqrt{n} \left(\frac{L_2}{2R_2} \left(\frac{k_z^2}{k_r^2} + \frac{k_r^2}{n^2} R_2^2 \right) + \frac{k_z^2 R_2^2}{n^2} \cdot \left(1 - \frac{n^2}{\mu_{n1}^2} \right) \right) \quad - \text{ для гиротонов;}$$

$$E_{mi} \left[\frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right] = 10 A_i \frac{m_0 \omega_0 c}{e} \quad - \text{ максимальная напряженность электрического поля в области взаимодействия гиросконов и гиротонов,}$$

где $R_i = v_{n1} / n$ – приведенный радиус i -резонатора гироскона; $A_i = e E_{mi} / (m_0 \omega_0 c)$;

E_{mi} – амплитуда СВЧ-поля в i -м резонаторе; $J_n(v_{n1}) = 0$, $J_n'(\mu_{n1}) = 0$;

n – коэффициент умножения; $k_z = n / \beta_p = l\pi / L_2$; $k_r = \sqrt{n^2 - k_z^2} = n \sqrt{1 - 1 / \beta_p^2}$;

L_i – приведенные длины резонаторов, N_n – нормирующий коэффициент;

$R_2 = \frac{\mu_{n1}}{k_r}$ – приведенный радиус резонатора гиротона.

Принцип умножения частоты в СВЧ-приборах с круговой разверткой релятивистского электронного пучка во вращающейся E_{110} -моду на частоте ω_0 резонатора модулятора был предложен А.А. Кураевым. В таком множителе развернутый по кругу РЭП возбуждает в выходном резонаторе вращающуюся $E_{n1\ell}$ - или $H_{n1\ell}$ -моду на частоте $n\omega_0$, т.е. номер гармоники совпадает с азимутальным номером. В институте ядерной физики им. Г.И. Будкера прошел испытание один из вариантов гиротона-умножителя магнискон-удвоитель на E_{210} -волне. При выходной мощности 55 МВт, рабочей частоте 7 ГГц был достигнут КПД 56 % при ускоряющем напряжении 427 кВ.

В гиросконе-умножителе прямолинейный релятивистский электронный поток входит по оси в модулирующий резонатор с определенными размерами для возбуждения E_{110} -поля, вращающегося с частотой сигнала ω_0 . Под действием поперечной магнитной составляющей этого поля происходит разворот электронного потока в форму спирали. Проходя далее трубку дрейфа в нарастающем вдоль оси магнитном поле, электроны, достигая нужного удаления от оси в верхней точке циркуляции, входят в выходной резонатор, с собственным полем на вращающейся с частотой $n\omega_0$ моде E_{n10} в одинаковой тормозящей фазе. Характеристики варианта четырехкаскадного удвоителя представлены на рисунке 6 для моды E_{210} . Сравнивая характеристики вариантов

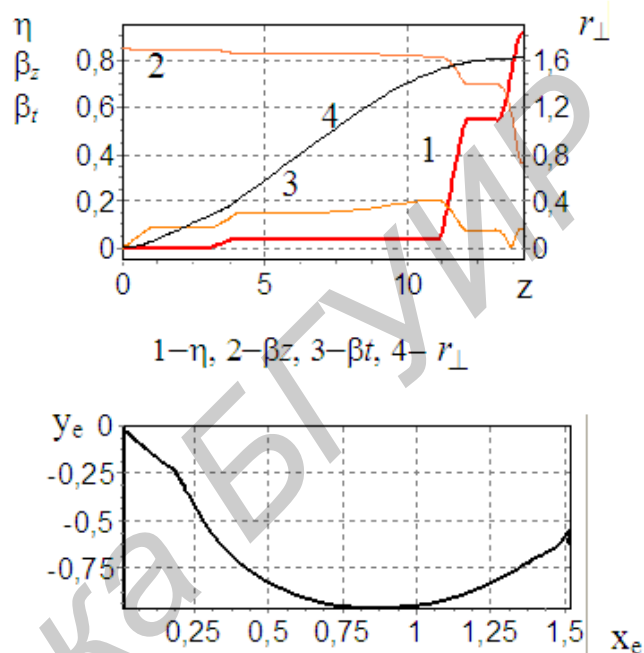
четырёх- и двухкаскадных умножителей, необходимо указать на уменьшение вдвое амплитуд в отбирающем резонаторе четырехкаскадного умножителя, а также снижение амплитуды модуляторов, что обеспечивает коэффициент усиления $K_u \sim 34$ дБ против $K_u \sim 19$ дБ. В остальном характеристики вариантов схожи. Для вычисления пробивной напряженности поля прибора, которая может быть достигнута из-за

необходимости торможения электронов высоких энергий на коротком расстоянии, определяемом длиной волны, были выведены оригинальные формулы. Для пробивной напряженности поля $E_{пр} \sim 200$ кВ/см находим оценку предельной длины волны сигнала гирокон-умножителя: $\lambda \geq 16A_n$ см. Отсюда при $n=1,2,3,4$ предельное значение длины волны сигнала будет соответственно $\lambda_{пр} \sim 10, 20, 30, 40$ см для электронного пучка с напряжением 450 кВ. За счет использования двухкаскадного отбирателя максимальную амплитуду полей можно уменьшить в два раза, например, в четырехкаскадном гироконе удвоителе, имея сигнал на частоте, соответствующей $\lambda=10$

см, можно на выходе получить сигнал на $\lambda=5$ см с $K_u \sim 33$ дБ. В гирокон-четверителе для этого понадобится сигнал той же мощности, но с длиной волны $\lambda=20$ см. Выполненные расчеты показывают, что гирокон-умножитель с продольным магнитным полем является перспективным источником СВЧ мощности 100 – 500 МВт в диапазоне частот $f < 6$ ГГц, имеющим КПД преобразования энергии электронов порядка 90 %.

В гиротоне-умножителе проблема уменьшения амплитуды поля решается за счет того, что отбор энергии реализован в достаточно протяженном резонаторе на вращающейся моде при условии гирорезонанса. Характеристики варианта гиротона-удвоителя представлены на рисунке 7.

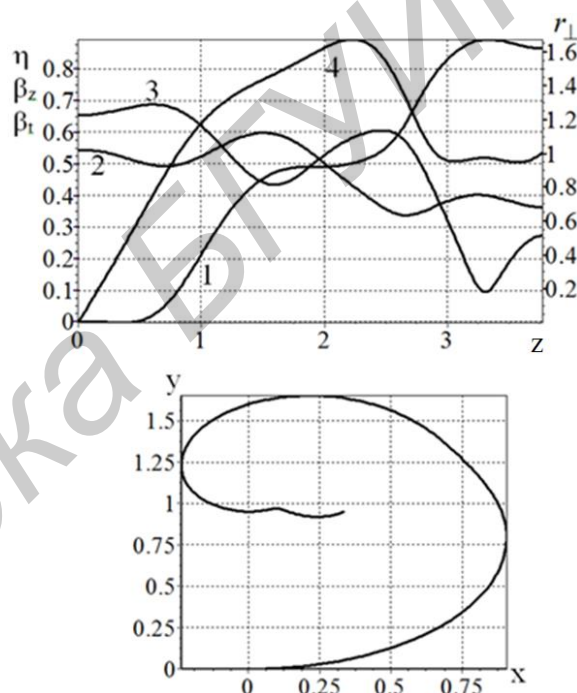
Анализ зависимостей КПД от начального радиуса электронного пучка r_0 указывает на то, что в умножителе предъявляются довольно жесткие



Кривые 1 – электронный КПД (η); 2 – продольная скорость (β_z); 3 – поперечная скорость относительные составляющие (β_t); 4 – максимальное расстояние пучка от оси (r_{\perp})
Рисунок 6. – Изменение характеристик движения и поперечная траектория электрона для варианта четырехкаскадного удвоителя моды E_{210} в отбирателе

ограничения на толщину пучка. Так, например, чтобы сохранить КПД на уровне 70 % при частоте выходного сигнала, соответствующей $\lambda=20$ см, толщина пучка ($2r_0$) не должна превышать 1,7, 1,2, 1,0, 0,4 см для $n=1-4$ соответственно.

Важным фактором, влияющим на использование гиротона, является отношение мощности потерь в выходном резонаторе к выходной мощности. При $n=1, 2, 3, 4$ для значений длины волны входного сигнала $\lambda \sim 20, 40, 60, 80$ см, (т. е. выходная мощность на $\lambda=20$ см) значения мощности потерь в отбирателе будут соответственно $P_{от} \sim 0,85, 3, 7,5, 20$ МВт. Если учесть, например, что для тока пучка 200 А выходная мощность для всех рассматриваемых умножителей составляет 73 – 78 МВт, то доля омических потерь мощности составит 1, 4, 10, 26 %. Мощность сигнала в модуляторе $P_{сиг} = U_0 I_0 \eta_1 + P_{\sigma}^{E_{110}} \approx \approx (0,9 + 0,24)$ МВт. Следует отметить, что приведенные расчеты выполнены для умножителей с одинаковыми параметрами модулятора. Если для учетверителя использовать отдельный модулятор с повышенным значением магнитного поля, то потери мощности можно снизить: так, при $F_2 = 1,54$; $A_2 = 1,7$; $\eta = 0,79$; $P_{\sigma}^{H_{414}} = 12$ МВт относительные потери составят не 26 %, а 16 %.



Кривые 1 – электронный КПД (η), 2 – продольная скорость (β_z), 3 – поперечная скорость относительные составляющие (β_t), 4 – максимальное расстояние пучка от оси (r_{\perp})
Рисунок 7. – Изменение характеристик движения электрона вдоль резонатора с H_{212} -модой и его поперечная траектория

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Гиротрон на замедленной E_{0i} -моду имеет не худшие выходные характеристики, чем обычный гиротрон на H_{0i} -моду квазирегулярного волновода. В рассматриваемом гиротроне возможно снижение уровня магнитостатического поля почти в два раза по сравнению с обычным гиротроном. Также можно сделать предположения о перспективности гиротронов на замедленной E_{0i} -моду гофрированного волновода. Взаимодействие на высоких гармониках циклотронной частоты в этих гиротронах должно быть значительно эффективнее, чем в обычных гиротронах из-за более резкого изменения интенсивности рабочей моды в поперечном сечении, чем объемной в квазигладких волноводах обычного гиротрона. Как и в черенковских усилителях и генераторах на E_{0i} -моду гофрированного волновода возможно существенное увеличение КПД за счет оптимизации распределения параметров гофра вдоль области взаимодействия [5, 9, 12, 14, 16, 18].

2. Выявлены предельные по эффективности режимы генерации при различной фазовой скорости релятивистских и слаборелятивистских пениотронов на быстрой H - или T -волне. Доказана перспективность конструкции пениотрона с аксиально-периодической многосвязной электродинамической системой, в которой возбуждается T -волна. Установлено, что при выполнении условий гирорезонанса со встречной волной в пениотронном генераторе его эффективность резко снижается, что вызвано сильной зависимостью КПД электронов от начальной относительной фазы, возникающей за счет гирорезонансной фазовой группировки электронов. Исследована зависимость пениотрона-генератора на H -волне от фазовой скорости β_p и найдены условия генерации, при которых эффект парциальной встречной волны может быть компенсирован за счет изменения β_p , что приводит к возможности достижения высоких КПД низкочастотных ($f \sim 2,4$ ГГц) пениотронов-генераторов на первой и второй гармониках при нерелятивистских скоростях электронов пучка [1, 2, 7, 15, 17].

3. Проведен анализ процессов генерации вращающейся E_{11l} -волны цилиндрического резонатора предварительно прямолинейным релятивистским потоком, указавший на то, что наиболее целесообразной является одно- или двухрезонаторная схема гиротона-генератора. Предложена эффективная схема гиротона-генератора. Проведенные исследования показывают, что использование процесса взаимодействия прямолинейного РЭП с вращающимися модами резонатора дает возможность создания гиротона-генератора с КПД более 90 % в сантиметровом диапазоне, где наиболее предпочтительным вариантом является использование комбинаций мод $H_{112}+E_{110}$ или $H_{113}+E_{110}$ как в однокаскадном

генераторе, так и в отбирателе двухкаскадного генератора. Показана возможность создания гиротона-усилителя в одном резонаторе, работающем на комбинированной $H_{113}+E_{110}$ -моду, в котором входной сигнал возбуждает E_{110} -моду, а вывод энергии осуществляется через H_{113} -моду [3].

4. Подтверждена эффективность гиротона и гирокона умножителей частоты на основе вычислительного эксперимента. Выполнен анализ предельных по пробивному напряжению амплитуд для возбуждаемых полей и соотношению потерь в стенках резонаторов с выходной мощностью указанных приборов. Ввиду специфического механизма усиления сигнала теоретически достигнуто двух-четырёхкратное умножение частоты при одинаковом коэффициенте усиления для гиротона с КПД более 79 %, а для гирокона большим 90 %, что в принципе невозможно в известных клистронах-умножителях. Показано, что такие умножители могут быть эффективны для получения большой СВЧ мощности [4, 6, 8, 10, 11, 13].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенная конструкция генерации и усиления в гиротроне и гиро-ЛБВ на E_{0i} -моду гофрированного волновода позволяет реализовать снижение требуемой индукции магнитостатического резонансного поля вдвое по сравнению с обычным гиротроном на H -волне.

Выполненное исследование сравнения компьютерного моделирования пениотронов на H - и T -волнах показало преимущество пениотрона генератора на H_{n1m} -полной парциальной волне.

Разработанный пакет программ и результаты расчета конструкций гиротонов-генераторов показали, что наилучшим КПД при относительно небольших входных значениях питч-фактора является комбинированный тип колебаний $E_{110}+H_{113}$, в которых преобразуется циклотронное излучение и дрейфовая энергия релятивистского электронного потока в мощную вращающуюся электромагнитную волну.

На основе вычислительного эксперимента созданы новые типы электронных приборов – гирокон- и гиротона-умножителей, в которых достигается двух- и четырехкратное умножение частоты при одинаковом коэффициенте усиления с КПД, большим 90 %.

Разработанные приборы являются перспективным источником СВЧ-средней и большой мощности в сантиметровом диапазоне длин волн.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Кураев, А.А. Пениотрон бегущей волны / А.А. Кураев, В.В. Матвеевко, А.К. Сеницын // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т. 38, № 5. – С. 916–921.
2. Кураев, А.А. Влияние циклотронного взаимодействия электронного потока со встречной волной в резонансных пениотронах / А.А. Кураев, В.В. Матвеевко, А.К. Сеницын // Радиотехника и электроника. – 1994. – Т. 39, № 10. – С. 1661–1666.
3. Кураев, А.А. Гиротроны–генераторы / А.А. Кураев, В.В. Матвеевко, А.К. Сеницын // Радиотехника и электроника. – 1994. – Т. 39, №11. – С. 1819–1824.
4. Матвеевко, В.В. Умножение частоты в гироконе с продольным магнитным полем / В.В. Матвеевко, А.К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2011. – № 5. – С. 12–18.
5. Кураев, А.А. Гиротрон на симметричной замедленной E_{0i} -моде гофрированного волновода / А.А. Кураев, В.В. Матвеевко, А.К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2011. – № 7. – С. 90–97.
6. Кураев, А.А. Исследование характеристик гиротона умножителя частоты / А.А. Кураев, В.В. Матвеевко, А.К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2012. – № 1. – С. 63–69.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

7. Кураев, А.А. Моделирование оптимальных по КПД процессов взаимодействия в пениотроне / А.А. Кураев, В.В. Матвеевко, А.К. Сеницын. // Науч.- конф. 30 лет БГУИР: материалы науч. конф., Минск, 1994 / Бел. гос. ун-т инф-ки и радиоэл-ки. – Минск, 1994. – С. 61–62.
8. Matveenko, V.V. Multiplication of Frequency in a Gyrocon with a longitudinal Magnetic Field / V.V. Matveenko, A.K. Sinitsyn // IVEC, Bangalore, India, 21–24 February, 2011 / Bangalore, 2011. – P. 449–450.
9. Kurayev, A.A. Gyrotron at Slowed E_{0i} -modes of Corrugated Waveguide / A.A. Kurayev, A.K. Sinitsyn, V.V. Matveenko // IVEC, California, USA, 24–26 April, 2012 / California, 2012. – P. 523–524.
10. Kurayev, A.A. Calculation of Characteristics of Gyroton Multiplier / A.A. Kurayev, A.K. Sinitsyn, V.V. Matveenko // IVEC, California, USA, 24–26 April, 2012 / California, 2012. – P. 527–528.
11. Матвеевко, В.В. Умножение частоты в гироконе с продольным магнитным полем / В.В. Матвеевко, А.К. Сеницын // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 21-й Междунар. Крымск. конф., Севастополь, 12–16 сент. 2011 / Севастополь, 2011. – С. 333–334.

12. Кураев, А.А. Моделирование гиротрона на замедленной E_{0i} -моду гофрированного волновода / А.А. Кураев, В.В. Матвеев, А.К. Сеницын // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Международ. Крымск. конф., Севастополь, 10–14 сент. 2012 / Севастополь, 2012. – С. 219–220.

13. Кураев, А.А. Моделирование гиротрона-умножителя частоты / А.А. Кураев, В.В. Матвеев, А.К. Сеницын // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 22-й Международ. Крымск. конф., Севастополь, 10–14 сент. 2012 / Севастополь, 2012. – С. 221–222.

14. Кураев, А.А. Моделирование гиро-ЛБВ на замедленной E_{0i} -моду / А.А. Кураев, В.В. Матвеев, А.К. Сеницын // Информационные технологии и системы: материалы Международ. науч.-техн. конф., Минск, 2013 / Бел. гос. ун-т инф-ки и радиоэл-ки. – Минск, 2013. – С. 218–219.

15. Кураев, А.А. Исследование влияния некоторых факторов на эффективность пениотрона / А.А. Кураев, В.В. Матвеев, А.К. Сеницын // Международ. науч.-техн. конф., приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР: материалы науч.-техн. конф., Минск, 2014 / Бел. гос. ун-т инф-ки и радиоэл-ки. – Минск, 2014. – С. 42–43.

16. Кураев, А.А. Гиро-ЛБВ на замедленной E_{0i} -моду / А.А. Кураев, В.В. Матвеев, А.К. Сеницын // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 24-й Международ. Крымск. конф., Севастополь, 7–13 сент. 2014 / Севастополь, 2014. – С. 199–200.

17. Кураев, А.А. Факторы, приводящие к снижению эффективности резонансного пениотрона / А.А. Кураев, В.В. Матвеев, А.К. Сеницын // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 24-й Международ. Крымск. конф., Севастополь, 7–13 сент. 2014 / Севастополь, 2014. – С. 201–202.

Патент

18. Гиротрон на E_{0i} -моду гофрированного волновода: пат. 2006.01 Респ. Беларусь, МПК Н 01J 25/00 / А.А. Кураев, В.В. Матвеев, А.К. Сеницын; заявитель Белорусский гос. ун-т инф-ки и радиоэл-ки. – № а 20120623; заявл. 16.04.12; опубл. 30.12.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 39.

РЭЗЮМЭ

Матвеевка Уладзімір Уладзіміравіч

Аптымальныя па ККД працэсы ўзаемадзеяння спіралепадобных электронных струменей з электрамагнітнымі хвалямі ў генератарах, ўзмацняльніках і памнажальніках частот

Ключавыя словы: рэгулярны хвалявод, гірарэзананс, гіратрон, пеніятрон, гіратон, гіракон, памнажальнік.

Аб'ект даследавання: ўстанаўленне фізічных асаблівасцяў гранічных па эфектыўнасці механізмаў генерацыі, узмацнення і множання электрамагнітных хваляў электроннымі патокамі пры ўмове арбітальнага і дрэйфавага рэзанансу ў гіратроне, пеніятроне, гіратоне і гіраконе, памнажальніках.

Мэта работы: даследаванне генерацыі, узмацнення і множання электрамагнітных хваляў спіралепадобнае электронным патокам ЗВЧ-дыяпазону ў цыліндрычных і гафрыраваных рэзанатарах і хваляводы і знаходжанне аптымальных рэжымаў працы розных прыбораў – гіратронаў, пеніятронаў, гіратонаў-памнажальнікаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна:

- Праведзена генерацыя ў гіратроне на запаволенай E_{0i} -модзе рэгулярнага гафрыраванага хвалявода і атрыманы наступныя выхадныя характарыстыкі, у якіх забяспечваецца зніжэнне патрабуемай індукцыі магнітастатычнага рэзананснага поля ўдвая ў параўнанні са звычайным гіратронам на H -хвалі пры нягоршых выходных характарыстыках.
- Выкананы даследаванні рэлятывісцкіх і слабарэлятывісцкіх электронных патокаў на хуткіх H - і T -хвалях. Выяўлена залежнасць аддачы энергіі ад фазавай хуткасці, а для пеніятронаў-генератараў – рэзкае зніжэнне эфектыўнасці з-за ўплыву сустрэчнай хвалі.
- Знойдзены эфект павышанага адбору гіратронаў-генератараў, заснаваны на ўзаемадзеянні прамалінейнага РЭП з круцячыміся электрамагнітнымі палямі, найлепшым ККД пры адносна невялікіх ўваходных значэннях пітч-фактару з'яўляецца камбінаваны тып ваганняў $E_{110}+H_{11l}$. Аптымальныя параметры гіратрона-генератара на круцячыхся E_{11l} -, H_{11l} - і гібрыднай $E_{110}+H_{11l}$ -модах, у якіх рэалізуецца цыклатроннае выпраменьванне.
- Выяўлена, што гіратон- і гіраконы-памнажальнікі могуць быць эфектыўныя для атрымання вялікай ЗВЧ-магутнасці ў дыяпазоне ад 10 да 80 сантыметраў даўжынь хваляў пры двух–чатырохкратным памнажэнні частаты пры аднолькавым каэфіцыенце ўзмацнення.

Вобласць прымянення: атрыманыя вынікі могуць быць выкарыстаны для распрацоўкі высокаэфектыўных канструкцый памнажальнікаў і ўзмацняльнікаў магутнасці і генератараў ЗВЧ.

РЕЗЮМЕ

Матвеевко Владимир Владимирович

Оптимальные по КПД процессы взаимодействия спиралевидных электронных потоков с электромагнитными волнами в генераторах, усилителях и умножителях частоты

Ключевые слова: регулярный волновод, гирорезонанс, гиротрон, пениотрон, гиротон, гирокон, умножитель.

Объект исследования: установление физических особенностей, предельных по эффективности механизмов генерации, усиления и умножения электромагнитных волн электронными потоками при условии орбитального и дрейфового резонанса в гиротроне, пениотроне, гиротоне и гироконе, умножителях.

Цель работы: исследование генерации, усиления и умножения электромагнитных волн спиралевидным электронным потоком СВЧ-диапазона в цилиндрических и гофрированных резонаторах и волноводах и нахождение оптимальных режимов работы различных приборов – гиротронов, пениотронов, гиротонов-умножителей.

Полученные результаты и их новизна:

- Проведена генерация в гиротроне на замедленной E_{0i} -моды регулярного гофрированного волновода и найдены выходные характеристики, в которых обеспечивается снижение требуемой индукции магнитостатического резонансного поля вдвое по сравнению с обычным гиротроном на H -волне при нехудших выходных характеристиках.
- Выполнены исследования релятивистских и слаборелятивистских электронных потоков на быстрых H - и T -волнах. Выявлена зависимость отдачи энергии от фазовой скорости, а для пениотронов-генераторов – резкое снижение эффективности из-за влияния встречной волны.
- Обнаружен эффект повышенного отбора гиротонов-генераторов, основанный на взаимодействии прямолинейного РЭП с вращающимися электромагнитными полями, наилучшим КПД при относительно небольших входных значениях питч-фактора является комбинированный тип колебаний $E_{110}+H_{11l}$. Оптимальные параметры гиротона-генератора на вращающихся E_{11l} , H_{11l} и гибридной $E_{110}+H_{11l}$ -модах, в которых реализуется циклотронное излучение.
- Выявлено, что гиротон- и гирокон-умножители могут быть эффективны для получения большой СВЧ-мощности в диапазоне от 10 до 80 сантиметров длин волн при двух – четырехкратном умножении частоты при одинаковом коэффициенте усиления.

Область применения: полученные результаты могут быть использованы для разработки высокоэффективных конструкций умножителей и усилителей мощности и генераторов СВЧ.

SUMMARY

Vladimir Vladimirovich Matveenko

Optimal effective processes of interaction of spiral-form electronic flows with electromagnetic waves in generators, amplifiers and multipliers of frequency

Keywords: regular waveguide, gyroresonance, gyrotron, peniotron, gyroton, gyrocon, multiplier.

The researched object: finding out the physical features, maximum effectiveness of the mechanisms of the generation, the amplification and the multiplication of the electromagnetic waves under impact of the electronic flows providing the orbital and the drift resonance in gyrotron, peniotron, gyroton-multiplier, gyrocon-multiplier.

The aim of the work: researching the generation, amplification and multiplication of the electromagnetic waves of the microwave range under impact of the spiral electronic flow in cylindrical and corrugated resonators and waveguides and finding the optimal modes of operation of various devices so as peniotron, gyrotron, gyroton-multiplier.

The results and novelty:

- There was made the generation with the slow gyrotron E_{0i} -mode of regular corrugated waveguide and produced the following output characteristics, which reduce the required induction magnetostatic resonant field by half compared to conventional gyrotron (on H -wave) for not worse output characteristics.
- There was researched relativistic and under relativistic electronic flows on a fast H - and T -waves. There was found out the dependence of the energy emission of the phase velocity, but peniotron-generators decline sharply their efficiency due to the influence of the oncoming wave.
- There was found out the effect of increased taking off gyrotons-generators based on the interaction of straight relativistic electronic flow with rotating electromagnetic fields, the best efficiency with comparably small input values pitch-factor is the combined type oscillations $E_{110}+H_{11l}$. The optimal parameters of gyroton-generator work is rotating E_{11l^-} , H_{11l^-} and hybrid $E_{110}+H_{11l^-}$ -modes that implement the cyclotron radiation.
- There was found out that gyroton- and gyrocon-multipliers can be effective for getting great microwave power for range from 10 to 80 cm of wavelengths, with two or four fold frequency multiplications with the same coefficient of amplification.

Field of application: the results obtained can be used to develop high-efficiency designs of multipliers, amplifiers and generators of microwave.

Научное издание

Матвеевко Владимир Владимирович

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО КПД ПРОЦЕССЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СПИРАЛЕВИДНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВОЛНАМИ В ГЕНЕРАТОРАХ,
УСИЛИТЕЛЯХ И УМНОЖИТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

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

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014,

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6