

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики открытых систем

**«Исследование влияния отражений от нерезонансной неоднородности в
выходном тракте на процессы стационарных и нестационарных
колебаний в гиротроне»**

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 431 группы
направления (специальности) 09.03.02

код и наименование направления

факультета нелинейных процессов

наименование факультета

Родиной Арины Андреевны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент каф. нелинейной физики СГУ

должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

А.Г. Рожнев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики открытых
систем

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

А.А. Короновский

инициалы, фамилия

Саратов 2019 г.

Введение. Гиротрон представляет собой мощный вакуумный электронный генератор миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, работающий на принципе синхронизма между циклотронной волной в поливинтовом электронном потоке, распространяющемся в продольном в постоянном продольном магнитном поле, и быстрой электромагнитной волной в гладком волноводе на частоте, близкой к критической частоте рабочей TE_{mn} моды. По механизму взаимодействия гиротрон относится к классу мазеров на циклотронном резонансе [1-2].

В настоящее время гиротрон рассматривается как основной кандидат на роль генератора мощного когерентного электромагнитного излучения в субтерагерцевом и терагерцевом диапазонах, благодаря возможности генерировать на этих частотах. Мощности достигают от десятков Ватт до нескольких Мегаватт в зависимости от тех приложений, в которых гиротрон используется [3].

В качестве таких приложений можно назвать: нагрев и диагностика плазмы в управляемых термоядерных реакциях [4], радиоспектроскопия [5], нагрев и спекание материалов в различных технологических процессах [6], источники терагерцевого диапазон для медицинских приборов, устройства связи [7], обеспечения безопасности [8] и т.д.

В большинстве этих приложений важнейшими задачами являются: обеспечение устойчивой работы гиротрона на требуемой рабочей моде, подавление возможности паразитных колебаний за счет возбуждения мод с другими типами распределения электромагнитного поля в поперечном сечении электродинамической структуры, управление спектром колебаний, в частности, перестройка частоты путем изменения магнитного поля, достижение малого уровня флуктуаций частоты генерации.

Одним из действенных методов управления спектром колебаний гиротрона является использование явления автосинхронизации, при котором часть генерируемой мощности колебаний возвращается в пространство взаимодействия, оказывая влияние на происходящие в нем процессы. Вопросы стабилизации частоты и подавление конкуренции мод за счет отражений от удаленной нагрузки в гиротроне стали исследоваться сравнительно недавно [9-16].

Основная цель выпускной квалификационной работы бакалавра состоит в исследовании влияния отражений от удаленной нерезонансной нагрузки в выходном тракте гиротрона терагерцевого диапазона, работающего на второй гармонике циклотронной частоты на мощность и частоту генерируемых колебаний.

Для достижения указанной цели в ходе работы были решены следующие задачи:

1. Проведено моделирование процессов установления колебаний в гиротроне терагерцевого диапазона с нерезонансной неоднородностью в выходном тракте при изменении величины магнитного поля.
2. Проведены расчеты мощности и частоты генерируемых колебаний в гиротроне в зависимости от магнитного поля для различных основного и высших продольных типов колебаний для различных значений коэффициента отражения от удаленной нерезонансной нагрузки.
3. Получены основные формулы и разработан алгоритм расчета стартовых режимов генерации гиротрона с нефиксированной структурой поля при наличии отражений в выходном тракте.

Содержание выпускной квалификационной работы бакалавра состоит из четырех разделов, заключения, списка использованных источников.

Во **Введении** сформулированы актуальной темы работы, ее цель и решенные задачи.

В первом разделе приведены уравнения нестационарной теории гиротрона с нефиксированной структурой поля, введены основные обозначения для физических величин и безразмерных параметров задачи.

Здесь же приведены и обсуждаются граничные условия, накладываемые на комплексную амплитуду поля рабочей моды, позволяющие адекватным образом описать процессы излучения генерируемой электромагнитной волны из резонатора гиротрона, а также возбуждение резонатора волной, отраженной от удаленной нерезонансной нагрузки.

Схематически модель, открытого резонатора гиротрона с отражателем, помещенного в выходной волновод, изображена на рисунке 1. Основными элементами являются: электронно-оптическая система, содержащая катод и анод. Эта система формирует винтовой электронный пучок, доля энергии которого содержится во вращательной энергии электронов; резонатор обеспечивает селекцию рабочей моды, с которой происходит взаимодействие электронного пучка; расширяющийся рупор и выходной однородный волновод; система вывода излучения, включающая выходное окно. Магнитное поле, необходимое для обеспечения циклотронного резонанса электронного пучка с высокочастотным полем создается при помощи

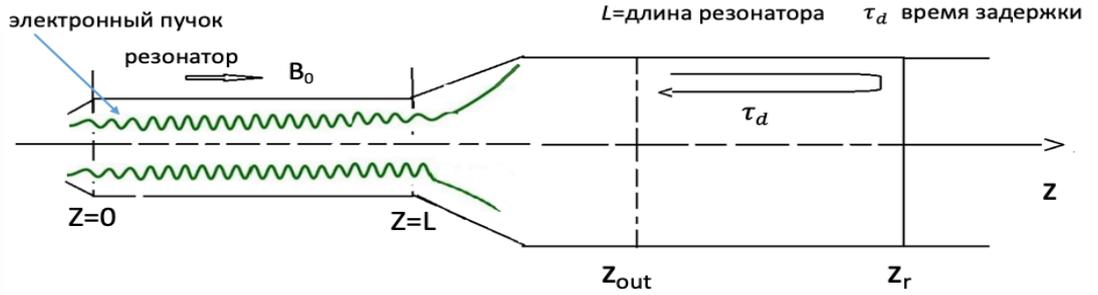


Рисунок 1 - Модель пространства взаимодействия гиротрона с выходным волноводом и удаленным отражателем

различного типа магнитных систем. Для гиротронов используются либо импульсные магнитные системы, либо сверхпроводящие криомагниты.

Безразмерные уравнения нестационарной теории гиротрона в условиях взаимодействия с одной поперечной модой в предположении нефиксированной структуры поля имеют вид [2]

$$\frac{\partial^2 F(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} - j s \frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \tau} + s(\delta - j d) F(\xi, \tau) = I_0 J(\xi, \tau),$$

$$\frac{dp(\xi, \tau)}{d\xi} + j(\Delta + |p(\xi, \tau)|^2 - 1)p(\xi, \tau) = jF(\xi, \tau)(p(\xi, \tau)^*)^{s-1}, \quad (1)$$

$$J(\xi, \tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(\xi, \tau)^s d\varphi_0.$$

Подразумевается зависимость всех величин от времени по закону $\exp(j\omega_0 t)$, где $\omega_0 \approx s\omega_H$ - критическая частота рабочей моды в выходном сечении пространства взаимодействия, $\omega_H = eB_0 / (m_0 c \gamma_0)$ - циклотронная частота вращения электрона в начале пространства взаимодействия, s - номер циклотронной гармоники.

В уравнении (1) используются следующие обозначения и параметры (формулы записаны в единицах системы СИ): $F(\xi, \tau)$ - безразмерная комплексная амплитуда поля рабочей моды; $J(\xi, \tau)$ - безразмерная комплексная амплитуда гармоники сгруппированного тока; $p(\xi, \tau)$ - безразмерный поперечный импульс электрона; $\tau = \omega_H \beta_{\perp 0}^4 / 8\beta_{\parallel 0}^2 t$ - безразмерное время; $\xi = (\beta_{\perp 0}^2 / 2\beta_{\parallel 0})(\omega_H z / c)$ - безразмерная продольная координата; $\bar{z} = (2\beta_{\parallel 0} / \beta_{\perp 0}^2)(c / \omega_H)$ - нормирующий множитель для координаты; $\Delta = (2 / \beta_{\perp 0}^2)(\omega_0 - s\omega_H) / \omega_0$ - параметр рассинхронизма; $\delta(\xi) = (8\beta_{\parallel 0}^2 / \beta_{\perp 0}^4)[\omega_0 - \omega(\xi)] / \omega_H$ - параметр расстройки, характеризующий

изменение критической частоты в слабо нерегулярном волноводе относительно ее значения ω_0 в выходном сечении пространства взаимодействия; $\mu = (\beta_{\perp 0}^2 / 2\beta_{\parallel 0}) (\omega_H L / c)$ - параметр неизохронности, играющий роль безразмерной длины системы; $\beta_{\perp 0} = v_{\perp 0} / c$ - релятивистский β -фактор для поперечной компоненты скорости электронов в начале пространства взаимодействия; $\beta_{\parallel 0} = v_{\parallel 0} / c$ - релятивистский β -фактор для продольной компоненты скорости электронов в начале пространства взаимодействия; $\gamma_0 = (1 - v^2 / c^2)^{-1/2} \approx (1 + \beta_{\perp 0}^2 / 2)(1 + \beta_{\parallel 0}^2 / 2)$ - релятивистский γ -фактор в начале пространства взаимодействия; e - заряд электрона; m_0 - масса электрона; c - скорость света;

Уравнения (1) необходимо дополнить граничными условиями. Для случая, когда граничное условие формулируется в плоскости z_{out} , находящейся в однородной части выходного волновода, а нерезонансный отражатель расположен в удаленной от этого сечения плоскости z_r (см. рисунок 1), граничное условие для поля в безразмерной форме имеет вид .

$$\left[\frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \xi} + j\kappa_0 F(\xi, \tau) + \frac{n}{2\kappa_0} \frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \tau} \right]_{\xi_{out}, \tau} = -\Gamma \left[\frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \xi} - j\kappa_0 F(\xi, \tau) - \frac{n}{2\kappa_0} \frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \tau} \right]_{\xi_{out}, \tau - \tau_d} . \quad (2)$$

где введен безразмерный параметр граничных условий $\kappa_0 = 2\beta_{\parallel 0} / \beta_{\perp 0}^2 (c \beta(\omega_0) / \omega_H)$ и величины ξ_{out} и τ_d обозначают безразмерные координату плоскости постановки граничного условия и время запаздывания сигнала в цепи обратной связи.

Если отражений от удаленной неоднородности нет, то $\Gamma = 0$ и из соотношения (2) получается ГУ вида

$$\left[\frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \xi} + j\kappa_0 F(\xi, \tau) + \frac{n}{2\kappa_0} \frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \tau} \right]_{\xi_{out}, \tau} = 0. \quad (3)$$

Необходимо также задать условия для значений безразмерных импульсов в начале пространства взаимодействия (при $\xi = \xi_1$):

$$p(\xi_1, \tau) = e^{j\varphi_0}, \quad 0 \leq \varphi_0 < 2\pi \quad (4)$$

и условия для поля в начальный момент времени.

$$F(\xi, 0) = F_0(\xi), \quad \xi_{in} \leq \xi \leq \xi_{out}. \quad (5)$$

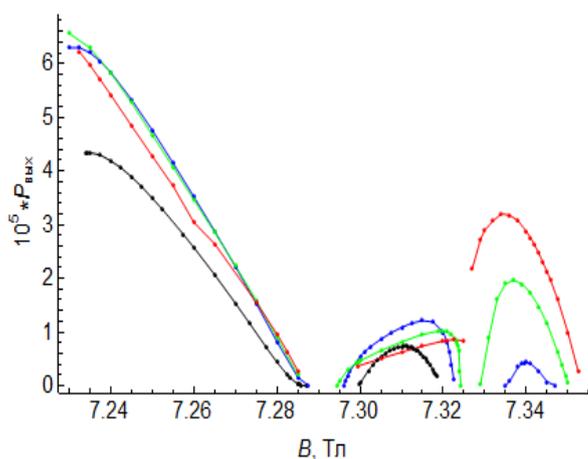


Рисунок 2 – Зависимости выходной мощности для первых трех мод колебаний от магнитного поля для диапазона 394 ГГц. Черные, синие, зеленые, красные линии соответствуют значениям коэффициента отражения $\Gamma = 0.0.0.2.0.4.0.6$

уравнения возбуждения используется схема предиктор-корректор, имеющая вторые порядки точности по координате и по времени. Для решения уравнений, описывающих изменение поперечных импульсов крупных частиц при их движении вдоль пространства взаимодействия применен метод Эйлера второго порядка.

В третьем разделе проводится численное моделирование нестационарных процессов в гиротроне с частотой 394 ГГц, работающем на второй циклотронной гармонике. Здесь приведены результаты исследования переходных процессов в гиротроне, возникающих на этапе установления колебаний в приборе. Помимо этого, исследуются режимы возбуждения основной и высших продольных $TE_{-2,6,q}$ мод гиротрона в ситуации, когда в выходном тракте расположен нерезонансный отражатель. Исследованы закономерности изменения мощности и частоты генерируемых колебаний при вариации постоянного магнитного поля для различных значений модуля коэффициента отражения.

Для численного моделирования используются программа, разработанная ранее для моделирования нестационарных процессов в гиротроне [16]. Геометрические размеры и электрические параметры исследуемого прибора взяты из статьи [12]. Гиротрон с рабочей модой $TE_{-2,6}$ работает на второй гармонике гирочастоты на частоте 394 ГГц, с напряжением электронного пучка 19 кВ, магнитное поле менялось в диапазоне 7.23–7.35 Т, питч фактор 1.5.

Уравнения (1), (2) или (3), (4) и (5) определяют замкнутую систему уравнений для моделирования нестационарных процессов в гиротроне с нефиксированной структурой поля при наличии нерезонансных отражений в выходном тракте.

Во втором разделе рассматривается численный алгоритм, реализующий решение краевой задачи, сформулированной в первом разделе. Для решения

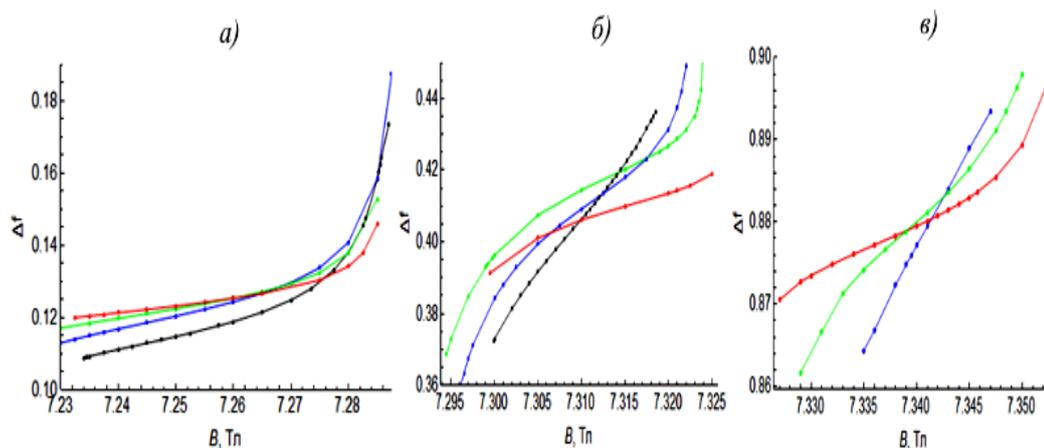


Рисунок 3 - Изменения частоты при изменении магнитного поля $\Delta f = f - f_0$ в увеличенном масштабе 1-3 моды. Черные, синие, зеленые, красные линии соответствуют значениям коэффициента отражения $\Gamma = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$

На рисунке 2 . приведена зависимость выходной мощности излучения и частоты для 1-3 мод от магнитного поля, бегущей от плоскости, где расположены ГУ до плоскости отражателя.

При изменении магнитного поля зависимости генерируемой мощности имеют вид отдельных зон генерации, каждая из которых соответствует взаимодействию электронного потока с полем одной из продольных мод открытого резонатора гиротрона. В расчета исследовались первая, вторая и третья зоны генерации. При меньших значениях магнитного поля (левый край зоны) – соответствующая мода не возбуждается. Однако при увеличении магнитного поля вблизи левого края зон генерации наблюдается эффект жесткого возбуждения колебаний. Зависимость работы гиротрона от магнитного поля проявляется гистерезисным образом. В режиме мягкого возбуждения (вблизи правого края зоны 1 моды колебаний) гистерезис проявляться не может, поскольку электроны взаимодействуют с прямой волной. На участке 7.23-7.24 Т амплитуда волны увеличивается, что вызывает поглощение энергии ВЧ поля.

На рисунке 3 изображено изменение частоты $\Delta f = f - f_0$, где f_0 - критическая частота $TE_{-2,6}$ моды круглого волновода, при изменении магнитного поля в увеличенном масштабе 1-3 моды (рисунки а,б,в). Черные, синие, зеленые, красные линии соответствуют значениям коэффициента отражения $\Gamma = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$.

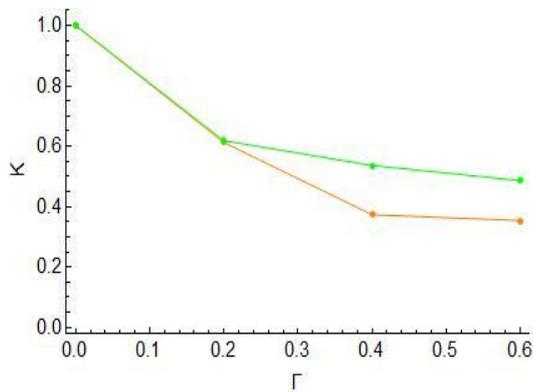


Рисунок 4 - Коэффициент стабилизации частоты в зависимости от модуля коэффициента отражения для первой (желтая линия) и второй (зеленая линия) зон генерации

Отражения уменьшают начальный ток, поэтому возбуждаются моды более высокого порядка, что приводит к более широкому диапазону частотной перестройки по сравнению со случаем отсутствия отражений.

В 1 зоне распределение поля соответствует 1-й полуволне вдоль резонатора,

а частота сдвинута относительно критической на величины порядка 100 МГц. Вблизи правого края зоны колебания возникают мягко, на этой границе частота генерации увеличивается, а амплитуда плавно стремится к нулю при приближении к границе зоны. Во 2-й зоне поле меняется в соответствии с синей кривой на участке 7.29-7.32 Т. Изменение частоты становится слабее из-за изменения магнитного поля. Это объяснено тем, что отражения изменяют добротность резонатора. При изменении коэффициента отражения ширина зон генерации уменьшается, наклон зависимостей частот генерации от магнитного поля уменьшается.

Для количественного описания эффективности стабилизации частоты за счет отражений вводят коэффициент стабилизации K с помощью соотношения

$$K = \frac{(\Delta f / \Delta B)}{(\Delta f / \Delta B)_{\Gamma=0}} \quad (6)$$

где величины, стоящие в числителе и знаменателе дроби есть численные аппроксимации производной df / dB в центре зоны генерации в случаях наличия и отсутствия отражений, соответственно.. Таким образом, для случая идеальной стабилизации коэффициент должен стремиться к нулю, а значения K , близкие к единице, соответствует худшей стабилизации. Согласно результатам моделирования стабильность частоты увеличивается с увеличением модуля коэффициента отражения Γ . Зависимость коэффициента K от величины коэффициента отражения приведена на рисунке 4

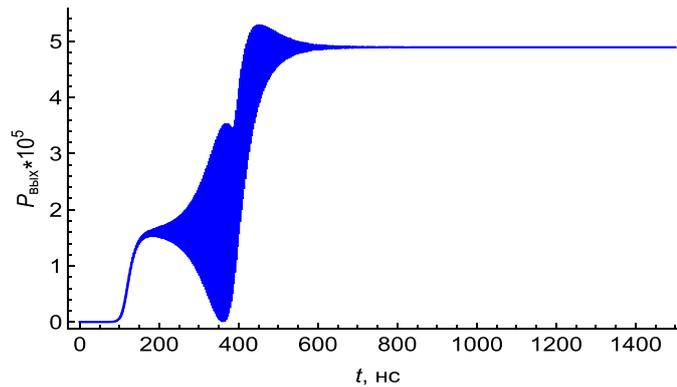


Рисунок 5 - Зависимость выходной безразмерной мощности $P_{\text{вых}} = (1 - |\Gamma|^2) |A_+|^2$ от времени

При численном моделировании исследовались характеристики распределения поля вдоль резонатора гиротрани при изменении коэффициента отражения и величины магнитного поля. Для параметров $\Gamma = 0.4$ и $B = 7.316 \text{ Т}$ характерно одногорбое распределение поля. Зависимость модуля комплексной амплитуды от продольной координаты при этом имеет один ярко выраженный максимум, находящийся примерно в центре резонатора, что характерно для первой продольной моды. Величина и длительность переходного процесса зависит от того насколько значение магнитного поля близко к краю зоны генерации. В середине зоны переходной процесс устанавливается довольно быстро за несколько периодов колебания.

Для параметров $\Gamma = 0.4$, $B = 7.316 \text{ Т}$ характерно двугорбое распределение поля это соответствует второй зоне генерации. Расстояние от середины до края зоны меньше, чем для первой зоны. Длительность переходного процесса, измеренная в периодах колебаний оказывается существенно большей для второй зоны, чем для первой

На рисунке 5 приведена зависимость выходной мощности от времени во время переходного процесса для $\Gamma = 0.6$ и $B = 7.235 \text{ Т}$. При этом хорошо виден процесс конкуренция мод на этапе установления колебаний. В качестве начального возмущения взято одногорбое распределение примерно соответствующее 1-й моде колебания с очень малой амплитудой.

На рисунке 6 приведены картины распределения комплексной амплитуды поля вдоль резонатора в различные моменты времени.

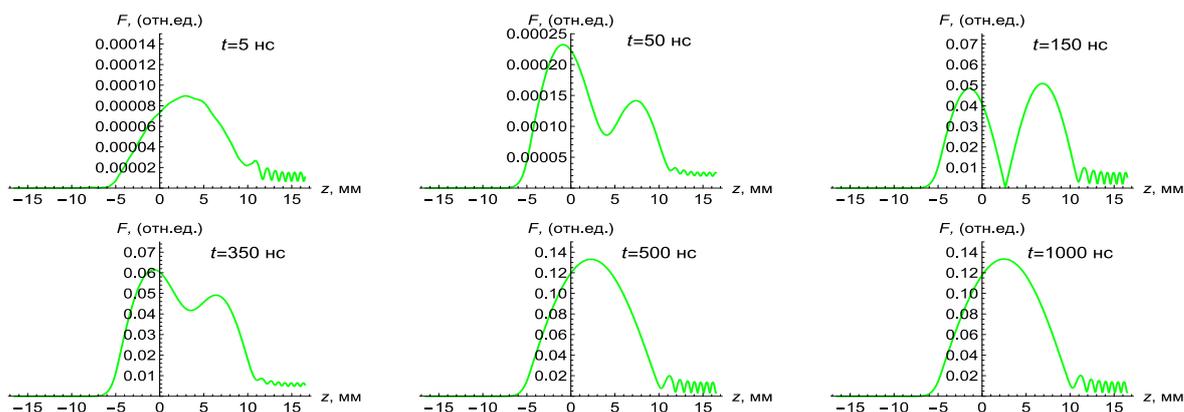


Рисунок 6– Распределения модуля поля вдоль оси резонатора в разные моменты времени. -

В момент времени 5 нс распределение поля соответствует начальному возмущению. Через 50 нс формируется двугорбое распределение, амплитуда которого постепенно растет во времени. При 150 нс двугорбое распределение, соответствующее второй моде, сформировано, но оно неустойчиво и начинает постепенно разрушаться. В момент времени 350 нс поле эволюционирует: два максимума поля в резонаторе совершают противофазные колебания, затем распределение, соответствующее 2-й моде разрушается, мощность колебаний выходит на более высокий уровень, при этом распределение поля соответствует первой продольной моде, которая уже стабилизируется и дальше не меняется. Конечное распределение отвечает первой моде колебаний.

Аналогичные процессы конкуренции мод наблюдаются при значениях магнитного поля, отвечающих границам между другими различными зонами колебаний.

В четвертом разделе работы получены формулы линейной теории гиротрона в приближении нефиксированной структуры поля в случае, когда в выходном тракте присутствуют отражения. На основе этих формул выведены уравнения, которым должны удовлетворять стартовые токи и частоты генерации гиротрона и разработана программа для системы «Mathematica» для расчета стартовых условий.

Линейная краевая задача представляет собой уравнения для распределений поля и тока вдоль однородной части резонатора

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{F}(\xi)}{d\xi^2} + (\Omega - jd) \bar{F}(\xi) &= \bar{I}_0 \bar{J}(\xi), \\ \frac{d^2 \bar{J}(\xi)}{d\xi^2} + 2j\bar{\Delta} \frac{d\bar{J}(\xi)}{d\xi} - \bar{\Delta}^2 \bar{J}(\xi) &= (1 - \bar{\Delta}) \bar{F}(\xi) + j \frac{d\bar{F}(\xi)}{d\xi}, \end{aligned} \quad (7)$$

а также условий, которым должны удовлетворять эти величины на границах пространства взаимодействия:

$$\left. \frac{d\bar{F}(\xi)}{d\xi} - j\kappa_l \bar{F}(\xi) \right|_{\xi=0} = 0, \quad \left. \frac{d\bar{F}(\xi)}{d\xi} + j\kappa_r \bar{F}(\xi) \right|_{\xi=0} = 0, \quad (8)$$

$$\bar{J}(0) = 0, \quad \bar{J}'(0) = j \bar{F}(0).$$

В формулах (8) величины $\kappa_{l,r}$ являются функциями частоты, конкретные формулы для которых, учитывающих процессы отражения от удаленной неоднородности в выходном тракте были получены в работах [14,15].

Решение линейной краевой задачи дает уравнение для расчета условий возникновения колебаний в гиротроне с нефиксированной структурой поля:

$$\sum_{i=1}^4 \frac{e^{-jk_i\mu} (-2\bar{I}_0 + (k_i - \bar{\Delta})^2 (k_i - \kappa_l)(k_i - \kappa_r))}{\bar{I}_0 - 2(\bar{\Delta} - k_i)(\Omega - jd + (\bar{\Delta} - 2k_i)k_i)} = 0. \quad (9)$$

где k_i - корни дисперсионного уравнения

$$\left[k^2 - (\Omega - jd) \right] (k - \bar{\Delta})^2 - \bar{I}_0 (k + 1 - \bar{\Delta}) = 0. \quad (10)$$

Для расчета стартовых условий возникновения генерации уравнение (9) решается следующим образом. Оно содержит шесть действительных параметров $\bar{\Delta}$, I_0 , μ и d , Ω' и Ω'' , где $\Omega = \Omega' + j\Omega''$ - комплексная частота колебаний. Можно зафиксировать величины $\bar{\Delta}$, μ и d , и предположить, что $\Omega'' = 0$. Тогда из уравнений (9) и (10) можно найти величины стартового тока \bar{I}_{0st} и (действительную) стартовую частоту колебаний $\Omega_{st} = \Omega'$. На основе этого алгоритма разработана программа расчета стартовых условий гиротрона в случае отражений в выходном тракте. Программа написана на языке программирования системы компьютерной математики «Mathematica».

В **Заключении** формулирований основные результаты, полученные в ходе выполнения бакалаврской работы:

1. Проведено численное моделирование нестационарных процессов в гиротроне терагерцевого диапазона, работающем на второй гармонике циклотронной частоты. Для моделирования использовалась программа, реализующая алгоритмы численного решения нестационарных уравнений гиротроне в приближении нефиксированной структуры поля. В ходе практики данная программа были проведены тестовые расчеты, подтвердившие корректность ее работы.
2. Исследованы переходные процессы в гиротроне, имеющем удаленный нерезонансный отражатель в выходном тракте, при фиксированном значении рабочего тока электронного пучка. Показано, что длительность

переходного процесса определяется значением магнитного поля, а именно, насколько эта величина близка к центрам зон генерации продольным мод резонатора гиротрона. Для значений магнитного поля, близких к центрам зон, переходной процесс имеет малую длительность и завершается установление одночастотных колебаний. Для значений магнитного поля, лежащих на границах зон генерации длительность переходных процессов значительно увеличивается и может сопровождаться эффектами конкуренции мод с различными продольными индексами.

3. Изучено влияние величины модуля коэффициента отражения от удаленной нерезонансной нагрузки, расположенной в выходном волноводе гиротрона. Показано, что введение отражений влияет на ширину зон генерации и на максимальные амплитуды колебаний. При увеличении коэффициента отражения Γ ширина зон генерации уменьшается, наклон зависимостей частот генерации от магнитного поля уменьшается, что способствует стабилизации частоты в гиротроне.
4. Получены формулы линейной теории гиротрона в приближении нефиксированной структурой поля с учетом отражений в входном тракте. На основе этих формул разработана программа расчета стартовых условий в гиротроне с отражениями выходного сигнала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Flyagin V.A., Gaponov A.V., Petelin M.I., Yulpatov V.K. The Gyrotron // IEEE Trans. on . MTT, 1977, V. 25, N 6. P. 514-521.
2. Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore & London: J. Hopkins University Press, 2004, 335 p.
3. Глявин М. Ю., Денисов Г.Г, Запелалов В. Е. и др. Терагерцевые гиротроны: состояние и перспективы / // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 8. С. 745–745.
4. Glyavin M. Y., Idehara T., Sabchevski S. P. Development of THz gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and their applications in physical research and high-power THz technologies // IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology. 2015. Vol. 5, no. 5. P. 788–797.
5. Nanni E. A., Barnes A. B., Griffin R. G., Temkin R. J. THz dynamic nuclear polarization NMR // IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology. 2011. V. 1, P. 145–163.

6. Erckmann V., Brand P., Braune H. et al. Electron cyclotron heating for W7-X: Physics and technology // *Fusion Science and Technology*. 2007. Vol. 52, P. 291–312.
7. Federici J., Moeller L. Review of Terahertz and Subterahertz Wireless Communications // *Journal of Applied Physics*. 2010. Vol. 107, no. 11. P. 6.
8. Federici J. F., Schulkin B., Huang F. et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs // *Semiconductor Science and Technology*. 2005. Vol. 20, no. 7. P. S266.
9. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Кулыгин М.Л., Новожилова Ю.В. Стабилизация частоты гиротрона отражением от нерезонансной и резонансной нагрузки // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. № 13. С. 25-32.
10. Melnikova M.M., Rozhnev A.G., Ryskin N.M., Tyshkun A.V., Glyavin M.Y., Novozhilova Y.V. Frequency stabilization of a 0.67-THz gyrotron by self-injection locking // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2016. Vol.63.No.3.P.1288–1293
11. Melnikova M.M., Usacheva S.A., Glyavin M.Yu., Novozhilova Yu.V., Ryskin N.M. Mode competition in a two-mode gyrotron with delayed reflections // *IEEE Trans. Plasma Sci*. 2014. Vol.42. No.8. P. 2030-2036.
12. Khutoryan E.M., Idehara T., Melnikova M.M., Ryskin N.M., Dumbrajs O. Influence of Reflections on Frequency Tunability and Mode Competition in the Second-Harmonic THz Gyrotron // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2017. Vol. 38, Is. 7, P. 824–837.
13. Мельникова М.М. Влияние запаздывающих отражений на стабилизацию частоты и процессы конкуренции мод в гиротроне. Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Саратовский государственный университет, Саратов. 2018 г.
14. Rozhnev A. G. Boundary Conditions in the Theory of Microwave Electron Devices with a Diffraction Energy Output // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2000. Vol. 45, no. Suppl. 1. P. 95–101.
15. Рожнев А.Г. Моделирование свободных колебаний и процессов взаимодействия электромагнитного поля с электронными потоками в открытых резонаторах гиротронов субтерагерцевого и терагерцевого диапазонов. Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Саратовский государственный университет. Саратов, 2019.
16. Рожнев А. Г., Мельникова М. М. Программа моделирования нестационарных процессов в гиротроне с нефиксированной структурой поля. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018664449 от 16.11.2018 г.