

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

Кафедра нелинейной физики

Исследование влияния отражений от неоднородности в выходном волноводе
и процессов синхронизации внешним сигналом в гиротроне с рабочей
частотой 394 ГГц, работающем на второй циклотронной гармонике

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 2211 группы
направления (специальности) 03.04.01 «Прикладные математика и физика»
института физики
Родиной Арины Андреевны

Научный руководитель
доцент каф. нелинейной физики СГУ
, к.ф.-м.н _____

А.Г. Рожнев

Зав. кафедрой физики нелинейной
физики
, к.ф.-м.н _____

Е.Н. Бегинин

Саратов 2021 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 [1-3].

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 [5], радиоспектроскопия [6], нагрев и спекание материалов в различных технологических процессах [7], источники терагерцевого диапазон для медицинских приборов, устройства связи, 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 [9-12].

Управление спектром генерации гиротрона при помощи синхронизации внешним гармоническим сигналом является еще одним перспективным и активно развивающимся направлением.

Влияние внешнего сигнала на динамику гиротрона активно изучается, начиная с 70-80-х годов [13]. В последние годы эта проблема вновь привлекла

большое внимание [14-16] Воздействие внешнего сигнала позволяет не только стабилизировать частоту и фазу рабочей моды, но и помогает обеспечить подавление паразитных мод.

Таким образом, тема выпускной квалификационной работы является актуальной для современной радиофизики и сверхвысокочастотной электроники.

Основная цель выпускной квалификационной работы магистра состоит в исследовании возможностей управления сигналом гиротрона при помощи синхронизации внешним или отраженным от удаленной нагрузки сигналом.

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

1. Проведено моделирование нестационарных процессов в гиротроне с учетом отраженного и внешнего сигнала на основе теории с нефиксированной структурой поля.
2. Проведены расчеты зависимостей мощности и частоты генерации от магнитного поля при различных отражениях. Анализ влияния параметров отраженного сигнала на коэффициент стабилизации частоты различных продольных мод.
3. Проведено исследование синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом на основе теории с нефиксированной структурой поля. Расчет и анализ резонансных кривых и языков синхронизации.
4. 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 магистра состоит из четырех разделов, заключения, списка использованных источников.

Во **Введении** сформулированы актуальность 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 описать процессы излучения генерируемой электромагнитной волны из резонатора гиротрона

Схематически модель, открытого резонатора гиротрона с отражателем, помещенного в выходной волновод, изображена на рисунке 1 Основными

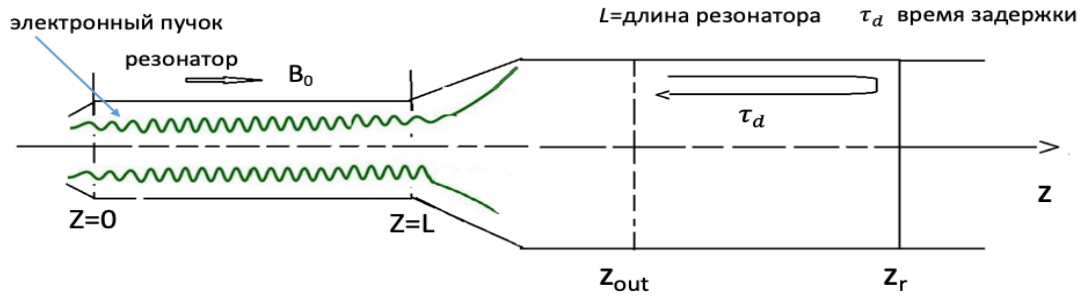


Рисунок 1-Модель пространства взаимодействия гиротрона с выходным волноводом и удаленным отражателем

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 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 [3]

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F(\xi, \tau)}{\partial \xi^2} - j s \frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \tau} + s(\delta - j d) F(\xi, \tau) &= I_0 J(\xi, \tau), \\ \frac{dp(\xi, \tau)}{d\xi} + j(\Delta + |p(\xi, \tau)|^2 - 1)p(\xi, \tau) &= jF(\xi, \tau)(p(\xi, \tau)^*)^{s-1}, \\ J(\xi, \tau) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(\xi, \tau)^s d\phi_0. \end{aligned} \quad (1)$$

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.

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 .

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

где введен безразмерный параметр граничных условий $\kappa_0 = 2\beta_{||0} / \beta_{\perp 0}^2 (c \beta(\omega_0) / \omega_H)$ 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

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

Приведены ГУ для случая с внешним сигналом. Величина комплексной амплитуды F_{in} в плоскости $z = z_{out}$ совпадает с амплитудой волны, бегущей в отрицательном направлении оси z описывает ГУ вида:

$$\left[\frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \xi} + j\kappa_0 F(\xi, \tau) + \frac{n}{2\kappa_0} \frac{\partial F(\xi, \tau)}{\partial \tau} \right]_{\xi_{out}} = 2j\kappa_0 F_{in}(\tau) + \frac{n}{\kappa_0} \frac{\partial F_{in}(\tau)}{\partial \tau}. \quad (4)$$

Необходимо также задать условия для значений безразмерных импульсов в начале пространства взаимодействия (при $\xi = \xi_1$): $p(\xi_1, \tau) = e^{j\varphi_0}$, $0 \leq \varphi_0 < 2\pi$ и условия для поля в начальный момент времени: $F(\xi, 0) = F_0(\xi)$, $\xi_{in} \leq \xi \leq \xi_{out}$.

Уравнения (1)-(5), уравнения для значений безразмерных импульсов и условия для поля определяют замкнутую систему уравнений для моделирования нестационарных процессов в гиротроне с нефиксированной структурой поля при наличии нерезонансных отражений, внешнего сигнала в выходном тракте.

Во втором разделе приведена численная методика для вычислений зависимостей пускового тока и пусковой частоты от магнитного поля. Для расчета используются линейные самосогласованные уравнения стационарных колебаний, в которых распределение поля и тока представляют собой малые возмущения фоне нулевого тривиального решения, гармонически меняющиеся во времени.

В качестве примера использования этой методики приведены результаты расчета стартовых условий гиротрона FU CW ПВ диапазона 394 ГГц, работающего на второй гармонике циклотронной частоты ($s = 2$), параметры которого даны в работе [11]. Его основные рабочие параметры представлены в Таблице I.

ТАБЛИЦА
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГИРОТРОНА FU CW ПВ.

Параметр	Значение
Частота, f (ГГц)	394.6
Радиус резонатора, R_g (мм)	2.36
Радиус пучка, R_b (мм)	0.63
Длина пространства взаимодействия, L (мм)	15
Напряжение пучка, U (кВ)	19
Ток пучка, I_b (А)	0.4
Магнитное поле, B (Тл)	7.25-7.32
Питч-фактор, g	1.4
Рабочая мода	$TE_{2,6}$

На рисунке 2 представлены зависимости стартовых токов (a) и стартовых частот (b) от магнитного поля для случая без отражений. Кривые, изображенные разными цветами, соответствуют возбуждению различных продольных мод в пространстве взаимодействия (в центральной однородной части резонатора). Эти моды отличаются различным распределением поперечной компоненты вектора электрического поля рабочей TE_{mn} моды вдоль оси резонатора. Горизонтальными штриховыми линиями показаны значения рабочего тока $I_b = 0.4$ А и критической частоты рабочей моды. При значениях магнитного поля, соответствующего центру зоны колебаний каждой из мод, число вариаций поля вдоль оси равно значению продольного индекса q , указанному рядом с каждой кривой. Так, для основной моды, которой соответствует кривая стартовых токов синего цвета, в центре зоны (при $B \approx 7.25$ Т) поле в резонаторе имеет один максимум, расположенный примерно в его центральной плоскости. Стартовая частота колебаний при этом

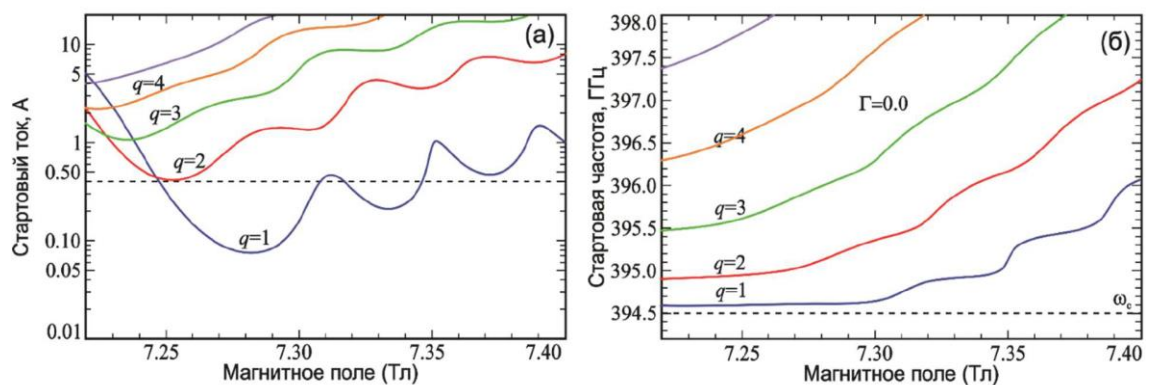


Рисунок 2 Зависимости стартовых токов (а) и частоты (б) от магнитного поля для гиротрона диапазона 394 ГГц [[11] в случае отсутствия отражений в выходном волноводе

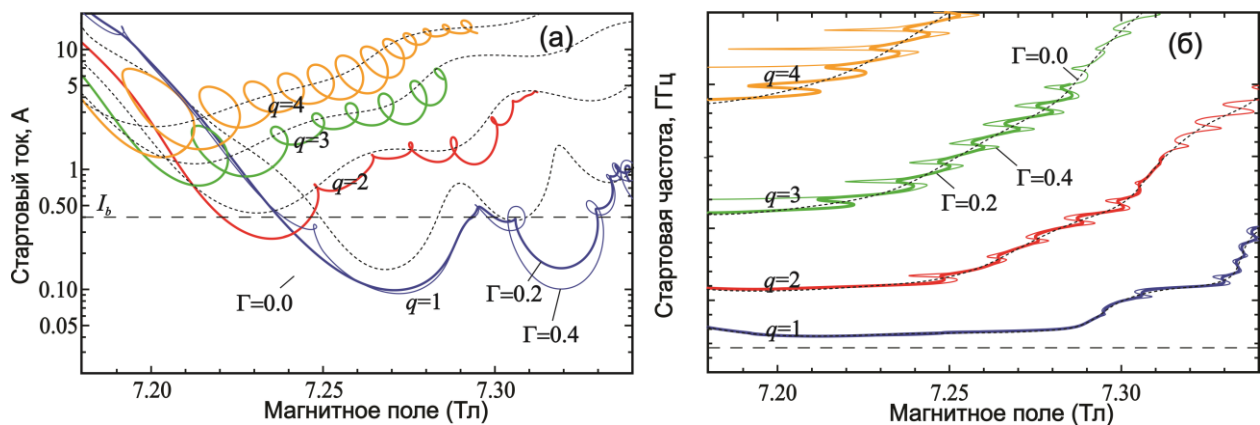


Рисунок 3.- Зависимости стартовых токов (а) и частоты (б) от магнитного поля в случае без отражений $\Gamma = 0$ и зависимости стартовых токов (в) и частоты (г) от магнитного поля при значениях коэффициента отражения: $\Gamma = 0.2$ (жирные линии) и $\Gamma = 0.4$ (тонкие линии).

примерно на 100 МГц превышает критическую частоту рабочей моды в однородной части резонатора.

В третьем разделе приведено численное моделирование нестационарных процессов в гиротроне FU CW ПВ диапазона 394 ГГц, работающего на второй гармонике циклотронной частоты ($s=2$) [17]. Данный прибор используется в спектроскопических установках, работающих на эффекте ядерного магнитного резонанса с динамической поляризацией ядер. Здесь приведены результаты исследования влияния отраженного сигнала на стартовые условия в гиротроне на основе теории с нефиксированной структурой высокочастотного поля.

В случае отсутствия отражений кривые стартовых токов и стартовых частот приведены на рисунке 2. При наличии отражений соответствующие кривые, рассчитанные для различных значений коэффициента отражений от нерезонансной неоднородности, расположенной в однородной части выходного волновода, показаны на рисунке 3.

На рисунке 4 приведены рассчитанные по нестационарной программе зависимости выходной мощности (а) и частоты (б) для первых трех мод колебаний от магнитного поля при токе пучка $I_b = 0.4$ А. Черная, синяя, зеленая и красная кривые отвечают коэффициентам отражения, равным, соответственно, $\Gamma = 0.0, 0.2, 0.4$ и 0.6 .

На левой границе каждой из зон наблюдается эффект жесткого возбуждения колебаний, когда колебания появляются сразу с конечной амплитудой. Вблизи правого края зон колебания возникают мягким образом, что соответствует нормальной бифуркации Андронова-Хопфа, при этом частота генерации увеличивается, а мощность плавно стремится к нулю при приближении к этой границе зоны со стороны меньших значений магнитного

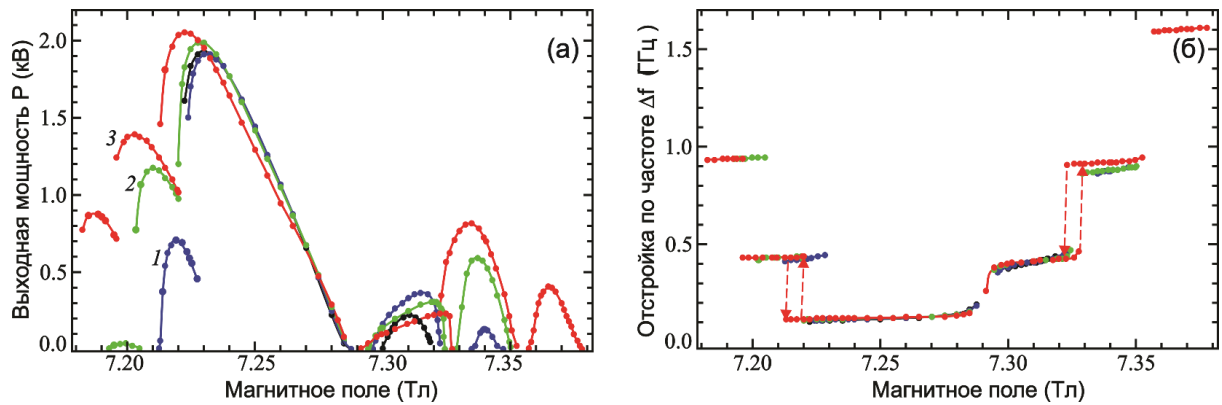


Рисунок 4 Зависимости выходной мощности (а) и частоты (б) для первых трех мод колебаний от магнитного поля. ГГц (черная, синяя, зеленая, красная ветви – коэффициентам отражения от неоднородности $\Gamma = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$)

поля. Численное моделирование показало, что введение отражений способствует снижению стартовых токов, причем этот эффект проявляется заметнее для высших продольных мод (Рис. 3(а)). Это приводит к увеличению числа наблюдаемых зон генерации при заданном токе пучка. Таким образом, введение отражений способствует расширению диапазона ступенчатой перестройки частоты по магнитному полю. При этом наклон зависимости стартовой частоты от магнитного поля становится более пологим, что демонстрирует эффект стабилизации частоты (Рис. 3(б)). стартовой частоты

Зависимость частоты от магнитного поля при фиксированном значении коэффициента отражения и для разных значений времени задержки в увеличенном масштабе для первой (а) зоны генерации представлена на рисунке 5. Численное моделирование показало, что увеличение расстояния до отражателя приводит к увеличению областей мультистабильности.

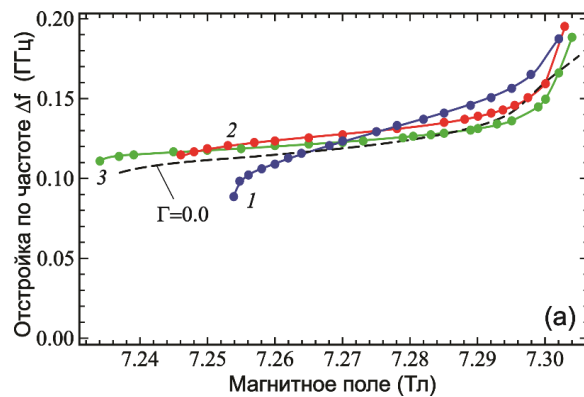


Рисунок 5- Зависимость частоты для трех зон генерации от магнитного поля для разных значений времени задержки $T_{ref} = 2, 3, 4$ (синяя, красная, зеленые кривые) в увеличенном масштабе для первой моды

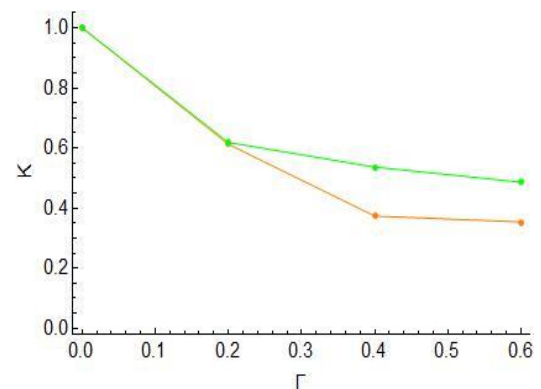


Рисунок 6 - Коэффициент стабилизации частоты в зависимости от модуля коэффициента отражения для первой (желтая линия) и второй (зеленая линия) зон генерации

Размер «петель» и ширина ступенек увеличиваются также с ростом номера q продольной моды при фиксированных значениях параметров отражения (коэффициента отражения Γ и расстояния до отражателя L_d (времени задержки T_{ref})

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 6.

В четвертом разделе приведено численное моделирование нестационарных процессов в гиротроне FU CW ИВ в присутствии внешнего сигнала

Анализ синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом проводился при различных значениях магнитного поля. На рисунке 7 приведены зоны синхронизации на плоскости параметров «безразмерная отстройка частот – мощность входного сигнала, рассчитанные для двух значений магнитного поля. Правая зона (красная кривая) рассчитана при $B_0 = 7.27 \text{ Тл}$, что соответствует центру зоны возбуждения основной продольной моды. Левая зона (синяя кривая) рассчитана при $B_0 = 7.41 \text{ Тл}$, что отвечает границе зоны возбуждения этой моды были исследованы зависимости частот спектральных компонент и амплитуд спектральных компонент для уровня величины входной мощности равной $P = 25 \text{ Ватт}$ и значения магнитного поля $B_0 = 7.41 \text{ Тл}$ (рисунок 8), где F_{ext} - частота внешнего воздействия, F_0 - критическая частота рабочей моды. Черная точки - точки, для который частота спектральной линии точно совпадает с частотой внешнего сигнала, зеленые - собственная частота генерации, остальные точки - их комбинационные составляющие

Вне языка синхронизации спектр обогащается множеством спектральных компонент, частоты которых являются комбинационными составляющими частоты основной продольной моды и частоты внешнего

сигнала (рис.8б). При частоте внешнего сигнала, соответствующей режиму синхронизации, наблюдается единственная спектральная компонента, амплитуда и частота которой соответствует основной продольной моде. Анализ зависимостей частот спектральных компонент и амплитуд при изменении частоты внешнего сигнала показывает, что в данном случае реализуется механизм синхронизации путем захвата частоты

Особое внимание уделено исследованию явления синхронизации в области мультистабильности. Согласно зависимостям стартовых токов от магнитного поля (рис. 2а) была определена область параметров, при которых устойчив как режим генерации основной продольной моды, так и режим генерации высшей (второй) продольной моды на попутной волне. Были выбраны значения рабочих параметров $B = 7.27 \text{ Тл}$, $I_b = 0.65 \text{ А}$, соответствующие этой области, для которых были построены границы областей синхронизации. Один из языков соответствует режиму

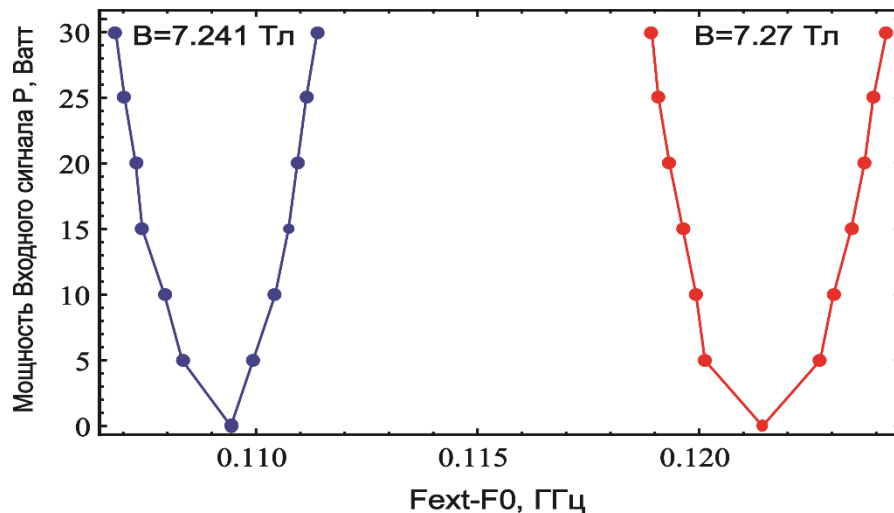


Рисунок 5 – Зоны синхронизации в областях при разных значениях магнитных полей $B = 7.241 \text{ Тл}$ и $B = 7.27 \text{ Тл}$. Значение тока $I_b = 0.4 \text{ А}$

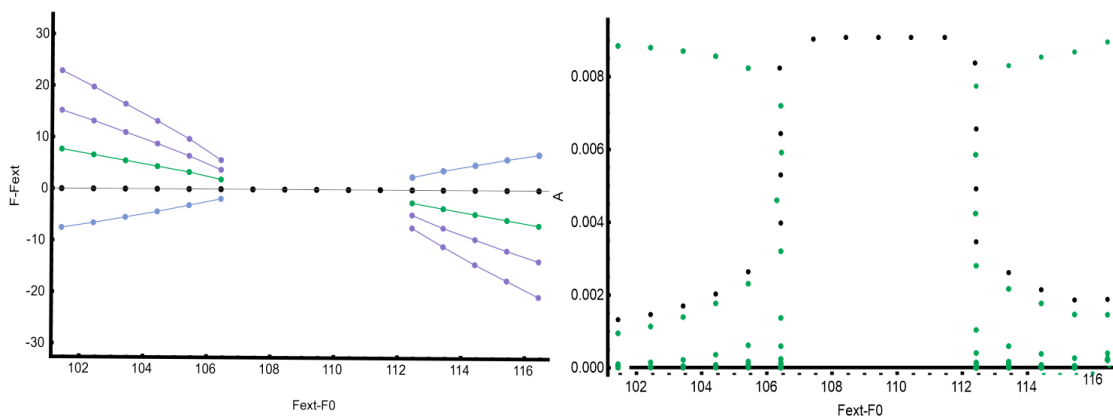


Рисунок 6– Зависимости частот (а) и амплитуд спектральных компонент (б) от частоты внешнего сигнала. для уровня величины входной мощности равной $P = 25 \text{ Ватт}$ $P=25$ и значения магнитного поля $B = 7.241 \text{ Тл}$.

синхронизации на основной продольной моде и имеет обыкновенную структуру. Вторая область имеет более сложную структуру вложенных друг в друга языков синхронизации. Анализ спектров генерации внутри области синхронизации показывает, что в области 2 при меньших значениях частоты внешнего сигнала наблюдается синхронизация на частоте высшей продольной моды. При увеличении частоты внешнего сигнала в области 3 режим синхронизации на второй продольной моде сменяется двухмодовым режимом генерации: в спектре присутствуют компоненты, соответствующие частотам основной и высшей продольной моды. Анализ спектров генерации внутри этой области показывает, что при меньших значениях частоты внешнего сигнала наблюдается синхронизация на частоте высшей продольной моды. При увеличении частоты внешнего сигнала режим синхронизации на второй продольной моде сменяется двухмодовым режимом генерации: в спектре присутствуют компоненты, соответствующие частотам основной и высшей продольной моды.

Анализ спектров генерации вне области слева от зоны синхронизации показывает, что в этой области реализуется механизм синхронизации путем подавления частоты, а вне области справа от зоны синхронизации механизм синхронизации путем захвата частоты.

В **Заключении** сформулируем основные результаты, полученные в ходе выполнения выпускной квалификационной 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 с ростом коэффициента отражения значения стартового тока в целом уменьшаются. При фиксированном токе увеличивается число наблюдаемых зон генерации, то есть, отражения способствуют расширению диапазона ступенчатой перестройки частоты. Структура зон генерации в присутствии отражений может иметь весьма сложный характер. Увеличение коэффициента отражения и расстояния до

отражателя способствует появлению областей мультистабильности на зависимостях стартового тока и частоты генерации от магнитного поля. Моделирование подтверждает наличие эффекта стабилизации частоты при введении отражений, что наглядно демонстрируют увеличенные фрагменты зависимостей сдвига частоты от магнитного поля для первых двух продольных мод. При увеличении времени запаздывания и коэффициента отражения эффект стабилизации частоты усиливается. Были рассчитаны значения коэффициента стабилизации при различных параметрах отраженного сигнала для первых двух продольных мод. Было показано, что эффект стабилизации частоты для высших продольных мод наблюдается заметнее

3. Изучена синхронизация гиротрона внешним гармоническим сигналом на основе программы моделирования нестационарных режимов колебаний в гиротроне с нефиксированной структурой поля. Исследовались границы области синхронизации при различных значениях магнитного поля. Особое внимание уделялось исследованию явления синхронизации в области мультистабильности. Была определена область параметров, при которых устойчив как режим генерации основной продольной моды, так и режим генерации высшей (второй) продольной моды. Были построены границы областей синхронизации. Анализ спектров генерации внутри этой области показывает, что при меньших значениях частоты внешнего сигнала наблюдается синхронизация на частоте высшей продольной моды. При увеличении частоты внешнего сигнала режим синхронизации на второй продольной моде сменяется двухмодовым режимом генерации: в спектре присутствуют компоненты, соответствующие частотам основной и высшей продольной моды.
4. Были проанализированы спектры колебаний вне зоны синхронизации, при выходе как через левую, так и через правую границы языка. Спектр колебаний становится многочастотным, причем в ряде случаев переход к многочастотному спектру происходит жестким образом. Было выявлено, что сценарии перехода в синхронный режим соответствуют известным механизмам подавления (гашения) и захвата частот.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Flyagin V.A., Gaponov A.V., Petelin M.I., Yulpatov V.K. The gyrotron // IEEE Trans. on MTT, Vol. 25, No. 6., P. 514-521, 1977.
2. Петелин М.И., Юлпатов В.К. Мазеры на циклотронном резонансе // Лекции по электронике СВЧ: 3-я зимняя школа-семинар инженеров. Кн. 3. Изд-во Саратов. ун-та, С. 95, 1974.
3. Nusinovich G.S. Introduction to the physics of gyrotrons. Baltimore & London: J. Hopkins University Press, 2004, 335 p.
4. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е. и др. Терагерцевые гиротроны: состояние и перспективы // Радиотехника и электроника, Т. 59, No. 8, С. 745–745, 2014.
5. 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 THz Science and Techn., Vol. 5, No. 5, P. 788–797, 2015.
6. Nanni E.A., Barnes A.B., Griffin R.G., Temkin R.J. THz dynamic nuclear polarization NMR // IEEE Trans. on THz Science and Techn., Vol. 1, No. 1, P. 145–163, 2011.
7. Erckmann V., Brand P., Braune H., et al. Electron cyclotron heating for W7-X: Physics and technology // Fusion Science and Technology, Vol. 52, No. 2, P. 291–312, 2007.
8. Federici J.F., Schulkin B., Huang F., et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs // Semiconductor Sci. and Tech., Vol. 20, No. 7, P. S266, 2005.
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. Т. 41, No 13, С. 25–32, 2015.
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, Vol. 63, No. 3, P. 1288–1293, 2016.
11. 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 // Int. J. Infrared Millim. Waves, Vol. 38, No. 7, P. 824–837, 2017.
12. 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.
13. Ергаков В.С., Моисеев М.А. К теории синхронизации МЦР-монотрона внешним сигналом // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 1. С. 120–131.
14. Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Рыскин Н.М., Бакунин В.Л., Богдашов А.А., Мельникова М.М., Фокин А.П. Стабилизация частоты гиротрона под влиянием внешнего монохроматического сигнала или отраженной от нагрузки волны: обзор // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика, Т. 25, No. 1, С. 4–11, 2017.
15. Rozhnev A.G. Boundary conditions in the theory of microwave electron devices with a diffraction energy output // Journal of Communications Technology and Electronics, Vol. 45, No. 1, P. 95–101, 2000.
16. 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.
17. 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 // Int. J. Infrared Millim. Waves, Vol. 38, No. 7, P. 824–837, 2017.

18. Родина А.А., Рожнев А.Г «Влияние отражений от нерезонансной нагрузки на генерацию колебаний в гиротроне терагерцевого диапазона частот» Сборник трудов XV Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, Изд-во «Техно-Декор», 2019. С. 206-207.
19. Родина А.А., Рожнев, М.М. Мельникова, Н.М. Рыскин «Исследование процессов синхронизации в гиротроне в условиях конкуренции продольных мод», Сборник трудов XV Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 8-10 сентября 2020 г., Саратов, Изд-во «Техно-декор». С. 315–316.;
20. Melnikova M.M., Rodina A.A., Rozhnev A.G., Ryskin N.M "Self-Consistent Calculation of Start-Oscillation Conditions in a Gyrotron with Reflections," 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), Saratov, Russia, 2020, pp. 73-77, doi: 10.1109/APEDE48864.2020.9255520.
21. Rodina A.A., Melnikova M.M., Ryskin N.M., Rozhnev A.G. «Self-consistent simulation of frequency stabilization in a gyrotron with delayed reflection» // 7th ITG International Vacuum Electronics Workshop (IVEW) and 13th International Vacuum Electron Sources Conference (IVeSC), 26-28 May 2020, Bad Honnef, Germany.
22. Rodina A.A., Melnikova M.M., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. “Injection Locking of Different Axial Modes in the Second-Harmonic THz-Band Gyrotron” 22nd International Vacuum Electronics Conference, IVEC 2021. 27-30 April, 2021.
23. Rodina A.A., Melnikova M.M., Grigorieva N.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. «Studying of injection locking of the second-harmonic THz-band gyrotron by an external driving signal» The 8th International Workshop on Far-Infrared Technologies (IW-FIRT 2021), Fukui, Japan. March 8-9, 2021. Poster presentation.

Приложение Б

Образец сопроводительного письма в научную библиотеку СГУ

Директору
Зональной научной библиотеки СГУ
Лебедевой И.В.

Сопроводительное письмо

Направляю Вам для размещения в открытой электронно-библиотечной системе авторефераты выпускных квалификационных работ студентов, обучающихся по направлению (специальности) _____.

код и наименование направления (специальности)

Темы выпускных квалификационных работ:

1.....

2.....

Подтверждаю, что из предоставленных материалов изъяты сведения в соответствии с требованиями Порядка проведения государственной итоговой аттестации по программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры (утв. приказом Минобрнауки России №636 от 29.06.2015) и законодательства РФ о размещении информации в открытом доступе.

Заведующий кафедрой

наименование кафедры

подпись, ФИО