

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

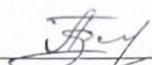
Кафедра нелинейной физики

**Численное моделирование взаимной синхронизации в системе двух  
связанных гиротронов**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

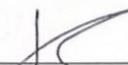
Студентки 4 курса 4011 группы  
направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»  
института физики  
Зарудной Марии Александровны

Научный руководитель  
доцент кафедры физики  
открытых систем, к.ф.-м.н.

  
\_\_\_\_\_ подпись, дата

А.Б. Адилова

Заведующий кафедрой  
нелинейной физики,  
к.ф.-м.н., доцент

  
\_\_\_\_\_ подпись, дата

Е. Н. Бегинин

Саратов 2024 год

Во **Введении** обоснована актуальность темы выпускной квалификационной работы, указаны её цели и задачи.

Одной из самых перспективных отраслей энергетики сегодня является получение энергии с помощью термоядерного синтеза. Термоядерный синтез — это процесс объединения двух легких атомных ядер в одно более тяжелое с выделением большого количества энергии. Такие реакции происходят в плазме — горячем заряженном газе, состоящем из положительных ионов и свободных электронов, обладающем уникальными свойствами. Электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках термоядерного синтеза — одно из главных применений гиротронов. В проекте ITER планируется использовать 26 мегаваттных гиротронов в миллиметровом диапазоне, работающих в квазинепрерывном режиме. Организация их совместной работы — важная задача, требующая синхронизации гиротронов.

Цель данной работы — выявление основных механизмов и закономерностей синхронизации в системах двух мощных гиротронов с задержкой.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Провести численное моделирование связанных мощных гиротронов на основе теории гиротрона с фиксированной структурой высокочастотного поля.
2. Построить зависимости КПД и частоты гиротронов от расстройки собственных частот и циклотронного резонанса.
3. Построить языки синхронизации двух гиротронов для реального распределения поля.

В **первой главе** изучено устройство и принцип действия гиротрона.

Гиротроны представляют собой тип мазеров, основанных на принципе циклотронного резонанса, при котором электроны, движущиеся по спиральным траекториям в магнитостатическом поле, резонансно взаимодействуют с волнами, распространяющимися почти перпендикулярно

направлению магнитного поля. По параметрам непрерывной и средней мощности, а также по уровню энергии в длительных импульсах, гиротроны значительно превосходят другие источники излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах на несколько порядков. Благодаря гиротронам стало возможным осуществить такие важные процессы, как электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, создание мощных радиолокационных систем миллиметрового диапазона, высокотемпературную обработку материалов с использованием миллиметрового излучения и многое другое.

Электронный поток формируется магнетронно-инжекторной пушкой с коническими поверхностями катода и анода. Электроны движутся по винтовым траекториям через резонатор и осаждаются на коллекторе. В нарастающем магнитном поле перед резонатором происходит компрессия электронного пучка, что уменьшает продольную скорость и увеличивает поперечную.

Электроны эффективно взаимодействуют с попутно вращающейся компонентой ВЧ поля, если частота поля соответствует или кратна циклотронной частоте. В результате формируются электронные сгустки, которые усиливают ВЧ поле резонатора. Рассмотрим механизм этих процессов: электроны, эмитированные с катода, равномерно распределены по трубкам тока. При движении под воздействием ВЧ поля в резонаторе их угловая скорость и радиус траектории изменяются в зависимости от направления движения и поля.

Во **второй главе** показаны основные уравнения теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля. Запишем основные уравнения нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой поля. В рамках этой теории уравнение движения электронов имеет вид:

$$\frac{dP}{d\zeta} + \frac{i}{n} (\Delta_H + |P^2| - 1)p = i \sum_s (P^*)^{n-1} A_s f_s(\zeta) \exp(i\Psi_s)$$

Здесь  $p$  — безразмерный поперечный импульс электрона,  $A$  — безразмерная комплексная амплитуда поля рабочей моды,  $f_s(\zeta)$  — функция, описывающая распределение поля в пространстве,  $n$  — номер циклотронной гармоники.

Гиротроны с высококачественными резонаторами играют важную роль в генерации ВЧ излучения, особенно в современных приложениях, таких как управляемый термоядерный синтез. Основные уравнения, описывающие процессы генерации в этих устройствах, можно представить следующим образом.

$$\frac{dA_s}{d\tau} + \frac{QA_s}{Q_s} = iI_s \int_0^{\zeta_k} J_s(\zeta, \tau) f_s^*(\zeta) d\zeta$$

Уравнение возбуждения описывает изменение амплитуды различных мод в резонаторе. Оно учитывает вклад каждой моды, включая гармонику тока и взаимодействие с ВЧ полем. Это уравнение показывает, как разные моды взаимодействуют и возбуждаются в резонаторе, определяя тем самым эффективность генерации.

Основные параметры:

1. Безразмерный параметр тока: Определяет вклад тока электронного пучка в процесс генерации. Он зависит от параметров гиротрона, таких как добротность резонатора и свойства электронного пучка.

$$I_s = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \left( \int_0^{2\pi} p^{ns} d\varphi_0 \right) e^{-i\Psi_s} d\Psi$$

2. Релятивистский масс-фактор: Учитывает релятивистские эффекты при движении электронов. Этот фактор важен для точного описания взаимодействия электронов с ВЧ полем.

$$\mu = \frac{\beta_{\perp}^2 \omega_0 L}{2\beta_{\parallel} c}$$

3. Циклотронная расстройка: Характеризует отклонение частоты циклотронного резонанса от основной частоты системы. Это отклонение влияет на условия резонанса и, следовательно, на эффективность генерации.

$$\Delta_H = \frac{2}{B_{\perp 0}^2} \frac{\omega_0 - n\omega_H}{\omega_0}$$

Эффективность гиротрона определяется его поперечным электронным КПД, который зависит от активной электронной восприимчивости. Анализ стационарных режимов работы позволяет определить области мягкого и жесткого возбуждения, в которых генерация происходит с различной степенью эффективности и устойчивости. Высокий КПД достигается в области жесткого возбуждения, что является ключевой характеристикой гиротрона.

В третьей главе продемонстрировано численное моделирование двух связанных гиротронов

Рабочей моделью для численного моделирования будут служить два мощных гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля.

$$\begin{aligned} \frac{dA_1}{d\tau} + \frac{i\Delta}{2} A_1 + A_1 &= I_0 \Phi(A_1) A_1 + \rho e^{-i\nu} A_2 (\tau - \tau_d), \\ \frac{dA_2}{d\tau} - \frac{i\Delta}{2} A_2 + A_2 &= I_0 \Phi(A_1) A_2 + \rho e^{-i\nu} A_1 (\tau - \tau_d). \end{aligned}$$

Здесь  $\Delta$  — безразмерная расстройка собственных частот,  $\tau = \omega_0 t / (2Q)$  — безразмерное время,  $\tau_d = \omega_0 t_d / (2Q)$  — нормированное время задержки  $t_d$ ,  $Q$  — добротность резонатора,  $I_0$  — безразмерный параметр тока,  $\rho = \sqrt{P_{in} / P_{out}}$  — коэффициент связи, который определяется отношением входной и выходной мощностей,  $\Phi(A_{1,2})$  — функции электронной восприимчивости, которые можно найти, решая известные уравнения нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой высокочастотного (ВЧ) поля.

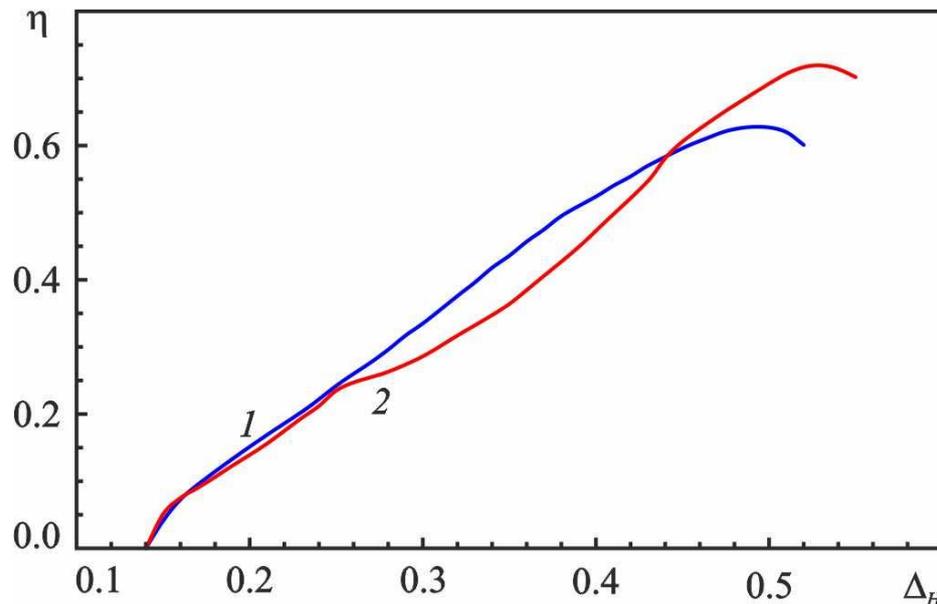


Рис. 1. Зависимости КПД одиночного гиротрона (синяя линия) и КПД связанных гиротронов (красная линия) от расстройки циклотронного резонанса  $\Delta_H$  при значении параметра тока  $I_b = 45$  А.

Видно, что с увеличением параметра тока увеличивается значение КПД, однако в реальных гиротронах большие значения токов сложно достичь. На (рис. 1) синей линией показана зависимость КПД от расстройки циклотронного резонанса при значении тока 45А (безразмерный параметр тока равен  $I_0 \approx 0.0156$ ). Видно, что в этом случае максимальное значение КПД 62.5%.

Было проведено исследование влияние связи. Были выбраны следующие параметры:  $\rho = 0.35$  (что составляет примерно 10% от выходной мощности),  $\psi = 0$ ,  $\tau = 1$ ,  $\Delta_s = 0.2$ . На (рис.1) красной линией показана зависимость КПД от расстройки циклотронного резонанса для этого случая при значении тока 45А, как и в случае одиночного гиротрона. Видно, что значение максимального КПД увеличилось до 72.2%, а также увеличилась область генерации.

Для взаимной синхронизации двух гиротронов с задержкой введены системы дифференциальных уравнений, описывающих их динамику.

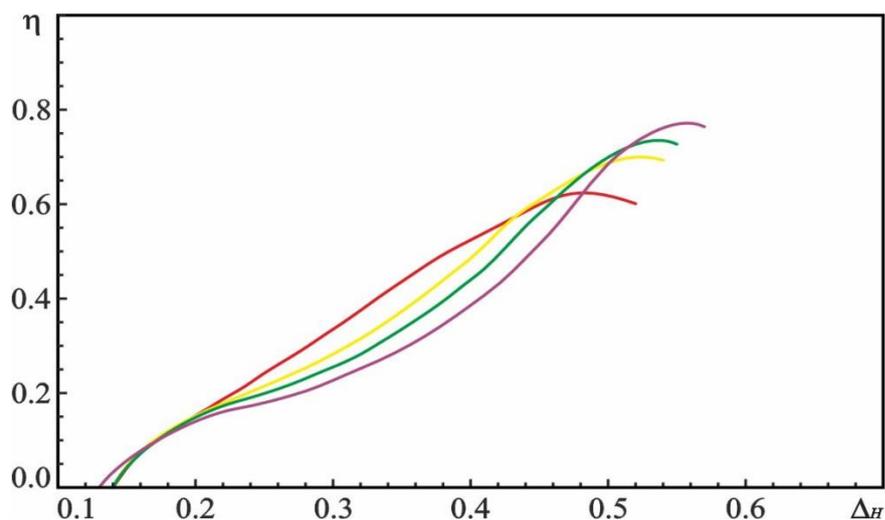


Рис. 2. Зависимости КПД гиротронов при  $I_s=45\text{A}$ ,  $D_H=0.4$ ,  $D_s=0.0$ ,  $\psi=0.0\pi$ ,  $t=1.0$  для синфазной моды при  $r=0.0$  (красная кривая),  $r=0.3$  (жёлтая кривая),  $r=0.4$  (зелёная кривая),  $r=0.5$  (фиолетовая кривая).

На (рис.2) можно увидеть, что с увеличением параметра связи наблюдается рост их коэффициента полезного действия. Если увеличивать влияние связи, то это может привести к увеличению эффективности преобразования энергии пучка в мощность микроволнового излучения за счёт более эффективной работы резонатора гиротрона.

Таким образом, построение и анализ графика зависимости КПД гиротронов от тока позволяют не только лучше понять динамику работы синхронизированных гиротронов, но и определить оптимальные режимы их эксплуатации, что существенно повышает общую эффективность и надежность этих устройств.

В **третьей главе** проведено исследование языков синхронизации двух связанных гиротронов.

Частотная синхронизация заключается в приведении частот двух гиротронов к единому значению.

Фазовая синхронизация достигается, когда разность фаз между двумя гиротронами остаётся постоянной во времени. Важно отметить, что фазовая синхронизация может происходить даже при наличии небольшой разницы

временных рядов в частотную область для выявления основных гармоник и оценки стабильности синхронизации.

Были проведено численное моделирование двух связанных гиротронов и построены графики языков синхронизации (рис.3.).

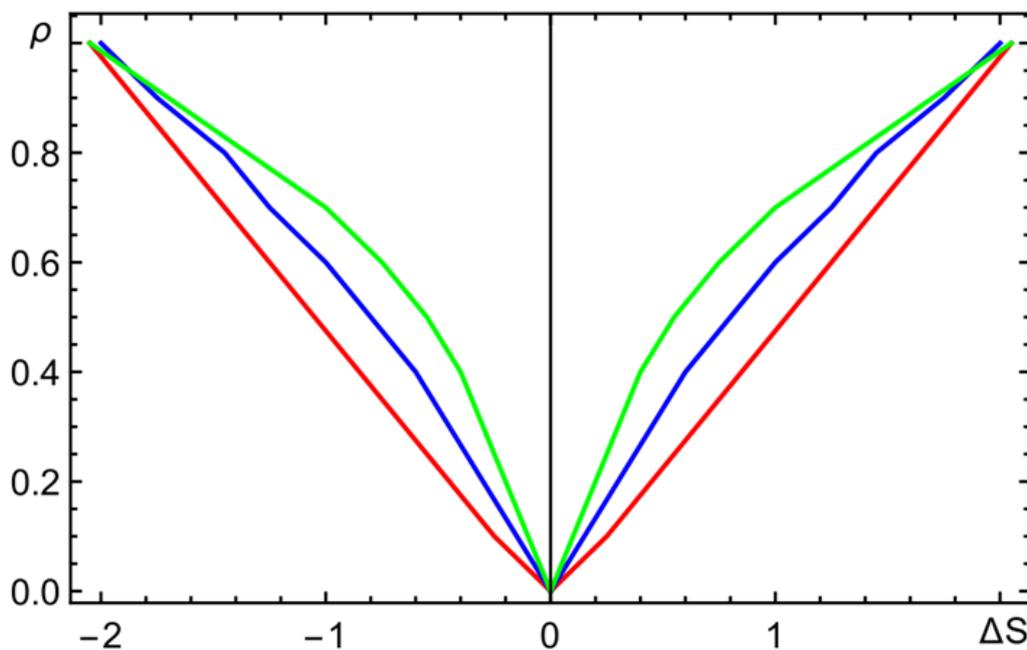


Рис.3. Языки синхронизации двух гиротронов,  $I_s=45\text{A}$ ,  $r=0.3$ ,  $\psi=0.0\pi$  (красная кривая),  $\psi=0.2\pi$  (синяя кривая),  $\psi=0.4\pi$  (зелёная кривая).

Понимание и правильное применение теории и практики синхронизации гиротронов открывает новые возможности для улучшения характеристик излучения и повышения эффективности работы этих устройств. Это особенно важно для высокотехнологичных отраслей, таких как ядерный синтез и высокотемпературная плазменная физика, где точность и мощность излучения играют ключевую роль.

Исследование языков синхронизации двух связанных гиротронов не только расширяет наши фундаментальные знания о нелинейной динамике и теории синхронизации, но также вносит существенный вклад в развитие практических приложений. Это позволяет улучшить характеристики и расширить возможности использования гиротронных систем в различных областях науки и техники.

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в выпускной квалификационной работе.

В теоретическом разделе были выведены основные уравнения, описывающие работу гиротрона с фиксированной структурой высокочастотного поля. Эти уравнения включают описание движения электронов в магнитном поле и взаимодействие электронного потока с высокочастотным полем резонатора.

Методы численного моделирования позволили исследовать динамику взаимодействия двух связанных гиротронов. Была протестирована модель, учитывающая основные параметры и условия работы гиротронов.. Было показано, что синхронизация гиротронов благоприятно влияет на повышение КПД.

Исследование взаимной синхронизации двух гиротронов, связанных с задержкой в передаче сигнала, выявило значительное влияние этой задержки на режимы работы системы.

Основное внимание в исследовании было уделено изучению языков синхронизации двух связанных гиротронов. Комбинация экспериментальных и теоретических исследований позволила выявить, что достижение синхронной работы возможно при определенных условиях взаимодействия. В рамках этой работы были выявлены различные режимы синхронизации, включая слабую и сильную синхронизацию.

Данная работа значительно расширила знания о гиротронных системах и предоставила как теоретические, так и практические основы для их более эффективного использования. Результаты работы могут быть ценны для будущих исследований и разработок в области высокочастотной электроники и радиофизики.

В заключении можно сказать, что цели и задачи, поставленные в этой работе, были успешно достигнуты и отражены в ее результате.

## Список литературы

1. Sakamoto K. Progress of high-power-gyrotron development for fusion research // Fusion Sci. Tech. 2007. Vol. 52. P. 145-153.
2. Adilova A.B., Ryskin N.M. Theory of Peer-to-Peer Locking of High-Power Gyrotron Oscillators Coupled with Delay // Electronics 2022, 11, 811.
3. Adilova A.B., Gerasimova S.A., Balakin M.I., Ryskin N.M. Bifurcation analysis of multistability of synchronous states in the system of two delaycoupled oscillators // Chaos. 2021. Vol. 31, No. 11. 113103.
4. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. The gyrotron at 50: historical overview // J. Infr. Millim. Terahertz Waves. 2014. Vol. 35, No. 4. P. 325–381.
5. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons, Baltimore, London: The Johns Hopkins University Press, 2004.
6. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
7. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. Зоны захвата частоты многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности внешним сигналом // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 12. С. 999-1011.
8. 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. 2017. Т. 25, № 1. С. 4-11.
9. Bakunin V.L., Glyavin M. Yu., Denisov G.G, Novozhilova Yu.V. Investigation of mode interaction for a gyrotron with dense mode spectrum // J. Electromag. Waves Appl. 2021. Vol. 35, No. 1. P. 19-26.
10. Рожнев А.Г., Мельникова М.М., Адилова А.Б., Рыскин Н.М. Программа расчета свойств продольных мод колебаний в открытом резонаторе гиротрона методом конечных разностей с

линеаризованными по спектральному параметру граничными условиями (GyrotronCavityFDM) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023614998. Дата государственной регистрации 09 марта 2023 г.

11. Thumm M. Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, No. 3. P. 590-599.
12. Glyavin M., Sabchevski S., Idehara T., Mitsudo S. Gyrotron-based technological systems for material processing—current status and prospects // J. Infr. Millim. Terahertz Waves. 2020. Vol. 41, No. 8. P. 1022–1037.