

На правах рукописи



ГРИГОРЬЕВА НАТАЛИЯ ВАДИМОВНА

ОСОБЕННОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ И ПОДАВЛЕНИЯ ПАРАЗИТНЫХ  
КОЛЕБАНИЙ В ГИРОТРОНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО  
ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА

1.3.4. – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель: **Рыскин Никита Михайлович,**  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Гинзбург Наум Самуилович,**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
чл.-корр. РАН, зав. отделом высокочастотной  
релятивистской электроники ФГБНУ «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной  
физики им. А.В. Гапонова–Грехова Российской  
академии наук», г. Нижний Новгород

**Голдобин Денис Сергеевич,**  
кандидат физико-математических наук, заведующий  
лабораторией подземной утилизации углерода  
«Институт механики сплошных сред Уральского  
отделения Российской академии наук» – филиал  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Пермского федерального  
исследовательского центра Уральского отделения  
Российской академии наук, г. Пермь

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

Защита состоится «20» декабря 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, X корпус, 511 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич СГУ имени Н.Г. Чернышевского (г. Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/osobnosti-sinkhronizacii-i-podavleniya-parazitnykh>

Автореферат разослан «\_\_» октября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.392.01



Слепченков Михаил Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время среди электровакуумных источников когерентного электромагнитного излучения несомненное лидерство по совокупности параметров в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн занимают гирорезонансные приборы, в первую очередь гиротроны<sup>1</sup>. Одной из наиболее важных областей применения гиротронов является электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС)<sup>2</sup>. Следует отметить, что в установках УТС используются комплексы из большого числа гиротронов, поэтому обеспечение их когерентной работы является крайне важным фактором. В частности, в последнее время привлекла внимание идея синхронизации мощного гиротрона сигналом гиротрона-драйвера со стабилизированной частотой<sup>3</sup>. Хотя исследования в области синхронизации гиротрона внешним сигналом были начаты еще в 1970-1980-х годах<sup>4</sup>, в последние годы интерес к этому вопросу значительно вырос, в первую очередь, в связи с развитием гиротронных комплексов для УТС. Для решения этой задачи был разработан новый тип встроенного квазиоптического преобразователя<sup>5</sup>, который позволяет одновременно осуществить ввод внешнего сигнала в резонатор гиротрона и вывод излучения мегаваттного уровня мощности через одно и то же вакуумное окно. Недавно в ИПФ РАН (г. Нижний Новгород) был разработан стабилизированный гиротрон-драйвер с необходимым уровнем мощности и с его помощью осуществлен эксперимент по синхронизации мощного гиротрона с частотой 170 ГГц<sup>6</sup>.

Следует отметить, что задача о синхронизации гиротрона внешним сигналом имеет ряд особенностей по сравнению с другими радиофизическими и электронными генераторами. Прежде всего, максимальный КПД в гиротроне, как правило, достигается в режиме жесткого возбуждения. В ряде работ развивалась теория синхронизации обобщенных моделей генератора с жестким возбуждением и был обнаружен ряд важных отличий от классической картины синхронизации генератора с мягким возбуждением<sup>7,8</sup>.

---

<sup>1</sup>Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. The gyrotron at 50: historical overview // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2014. Vol. 35, No. 4. P. 325–381.

<sup>2</sup>Thumm M.K.A., Denisov G.G., Sakamoto K., Tran M.Q. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nucl. Fusion. 2019. Vol. 59, No. 7. 073001.

<sup>3</sup>Denisov G.G. et al. Design of master oscillator for frequency locking of a complex of megawatt level microwave sources // Microw. Opt. Technol. Lett. 2020. Vol. 62, No. 6. P. 2137-2143.

<sup>4</sup>Ергаков В.С., Моисеев М.А., Хижняк В.И. К теории синхронизации МЦР-монотрона // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 12. С. 2591-2599.

<sup>5</sup>Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N. Perspective gyrotron with mode converter for co- and counter-rotation operating modes // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106, No. 26. P. 263501.

<sup>6</sup>Kuftin A.N. et al. First demonstration of frequency-locked operation of a 170 GHz/ 1 MW gyrotron // IEEE Electron Device Lett. 2023. Vol. 44, No. 9. P. 1563-1566.

<sup>7</sup>Кузнецов А.П., Милованов С.В. Синхронизация в системе с бифуркацией слияния устойчивого и неустойчивого предельных циклов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2003. Т. 11. № 4-5. С. 16-30.

<sup>8</sup>Yakunina K.A., Kuznetsov A.P., Ryskin N.M. Injection locking of an electronic maser in the hard excitation mode // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22, No. 11. 113107.

Однако остались неизученными многие важные с практической точки зрения вопросы, например, как внешний сигнал влияет на выходную мощность и КПД генератора, при каких условиях достигается максимальная ширина полосы синхронизации и т.д.

Воздействие внешнего сигнала позволяет не только стабилизировать частоту и фазу рабочей моды, но и помогает обеспечить подавление паразитных мод<sup>9</sup>. Поскольку при продвижении в область более высоких частот и больших мощностей в гиротроне переходят к работе на модах более высокого порядка, проблема конкуренции мод обостряется. В частности, при плотности спектра мод, соответствующей современным гиротронам для УТС, режим с максимальным КПД оказывается неустойчивым относительно возбуждения паразитных мод с соседними азимутальными индексами. Это вынуждает снижать рабочий ток генератора; соответственно, снижается и выходная мощность.

Наконец, еще одно возможное применение внешнего воздействия связано с подавлением возбуждения паразитных мод на фронте импульса тока и напряжения в процессе установления колебаний. Поскольку, как уже отмечалось, в мощном гиротроне рабочая мода, как правило, находится в режиме жесткого возбуждения, важным является вопрос о сценарии включения (т.е. о подборе зависимости тока и напряжения от времени в процессе включения). Однако на практике может произойти выброс тока и(или) напряжения на переднем фронте импульса, что может вызвать срыв генерации рабочей моды и, соответственно, возбуждение паразитной моды, для которой выполняются условия мягкого возбуждения<sup>10</sup>. Следует ожидать, что воздействие внешним сигналом в ходе переходного процесса позволит стабилизировать колебания рабочей моды.

В связи с вышесказанным, изучение динамики гиротрона под внешним воздействием, включая процессы синхронизации и подавления паразитных мод, представляет очевидный интерес для современной радиофизики и сверхвысокочастотной электроники.

**Целью** данной работы является теоретическое исследование фундаментальных особенностей синхронизации и подавления паразитных колебаний в гиротроне под воздействием внешнего сигнала при помощи методов теории колебаний и нелинейной динамики.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести детальный бифуркационный анализ одномодовой модели гиротрона под воздействием внешнего сигнала и выявить основные механизмы перехода в режим синхронизации;

---

<sup>9</sup>Новожилова Ю.В. и др. 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.

<sup>10</sup>Бакунин В.Л., Глявин М.Ю., Новожилова Ю.В., Седов А.С. Теоретическое исследование нелинейного взаимодействия мод на фронте импульса ускоряющего напряжения в мощном гиротроне с рабочей частотой 250 ГГц // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23, № 6. С. 36-45.

- развить модель теоретического анализа устойчивости рабочей моды в многомодовом гиротроне и определить условия подавления паразитных мод внешним сигналом;
- изучить возможности подавления паразитных мод в процессе установления колебаний при выбросе импульса на фронте напряжения.

**Достоверность научных выводов** работы подтверждается использованием хорошо апробированных аналитических и численных методов, соответствием результатов бифуркационного анализа и численного моделирования. Достоверность также подтверждается воспроизведением результатов, известных из литературы.

**Методы и объект исследования.** В ходе выполнения диссертационной работы были использованы различные методы и подходы теории колебаний и СВЧ электроники. Численное моделирование проводилось на основе хорошо известных уравнений одномодовой и многомодовой теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля. Теоретический анализ режимов синхронизации проводился с использованием упрощенной модели, в рамках которой электронная восприимчивость, определяющая мощность взаимодействия пучка с полем резонатора, предварительно рассчитывалась численно при различных значениях амплитуды поля и расстройки циклотронного резонанса, а затем с помощью интерполяции рассчитанных зависимостей выражалась как функция этих двух величин. Построение зоны устойчивой генерации рабочей моды в многомодовом гиротроне проводилось на основе известной методики анализа автомодуляционной неустойчивости, которая в рамках диссертации была адаптирована на случай неавтономного гиротрона. Колебательные режимы исследовались с помощью методов анализа устойчивости особых точек, построения карт динамических режимов, фазовых портретов.

**Научная новизна.** Все результаты, включенные в диссертационную работу, являются новыми и получены впервые, в частности:

- Развита упрощенная одномодовая модель гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля под воздействием внешнего сигнала, в которой функция электронной восприимчивости, выражена как функция амплитуды поля и расстройки циклотронного резонанса. Данная модель позволяет получить основные результаты аналитически, не прибегая к численному решению уравнений, описывающих динамику системы. В результате была построена детальная картина синхронизации внешним гармоническим сигналом для гиротрона в режиме жесткого возбуждения.
- Методика анализа автомодуляционной неустойчивости адаптирована на случай гиротрона под воздействием внешнего сигнала. На ее основе впервые проведен теоретический анализ структуры области синхронизации рабочей моды многомодового гиротрона с

эквидистантным спектром мод. Найдены условия подавления паразитных мод внешним сигналом.

- На примере мощного гиротрона диапазона 250 ГГц с рабочей модой  $TE_{19,8}$  продемонстрирована возможность использования внешнего сигнала для подавления паразитных мод, возбуждающихся на фронте импульса при скачке ускоряющего напряжения.

**Научная и практическая значимость** работы состоит в том, что результаты диссертации развивают и дополняют теоретические представления об особенностях динамики гиротронов и других автоколебательных систем с жестким возбуждением под воздействием внешнего сигнала. Результаты диссертации могут быть использованы для улучшения ряда характеристик (повышение стабильности частоты, подавление паразитных колебаний, повышение мощности и КПД генерации) гиротронов, которые находят широкое практическое применение.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично соискателем. Соискателем выполнен теоретический анализ исследуемых математических моделей, бифуркационный анализ режимов синхронизации, разработаны программы компьютерного моделирования, проведены численные эксперименты. Постановка задачи, обсуждение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с научным руководителем, а также с соавторами опубликованных работ.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. При воздействии внешнего сигнала на гиротрон в режиме жесткого возбуждения имеет место бистабильность стационарных одночастотных режимов. В зависимости от начальных условий реализуется либо режим синхронизации с высоким КПД, либо режим вынужденных колебаний с малой амплитудой и низким КПД. При частоте внешнего сигнала, близкой к собственной частоте автономного гиротрона, с увеличением амплитуды сигнала структура бассейнов притяжения трансформируется таким образом, что в определенном диапазоне начальной разности фаз колебаний гиротрона и внешнего сигнала фазовая траектория всегда стремится к особой точке, соответствующей режиму вынужденных колебаний, независимо от того, какова была начальная амплитуда.

2. Воздействие внешнего сигнала с мощностью, не превышающей 10% мощности генерации, на гиротрон, рабочий ток которого значительно (в 2-3 раза) ниже того, при котором в автономном гиротроне достигается максимальный КПД, позволяет получить режимы синхронизации с КПД, близкими к оптимальному. Синхронизация имеет место при изменении расстройки циклотронного резонанса в диапазоне, сопоставимом с шириной зоны генерации автономного гиротрона. При этом режимы с наиболее высоким КПД наблюдаются в области регенеративного усиления, где в автономном гиротроне возбуждение колебаний вообще отсутствует.

3. В гиротроне с эквидистантным спектром мод при значениях параметра плотности спектра мод, характерных для современных мощных гиротронов, используемых для нагрева и диагностики плазмы, зона устойчивости рабочей моды имеет сложную конфигурацию и образуется границами распадной неустойчивости для различных пар сателлитов. При воздействии внешним сигналом режимы синхронизации с высоким КПД являются устойчивыми относительно параметрического распада.

4. Воздействие внешним сигналом на начальной стадии переходного процесса в гиротроне с эквидистантным спектром мод позволяет расширить область расстроек циклотронного резонанса, в которой рабочая мода является устойчивой, и полностью подавить паразитные колебания при выбросе на фронте импульса напряжения.

**Апробация и публикации.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих школах, семинарах и конференциях: The 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2023), Chengdu, China, 2023, 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019), Paris, France, 2019, The 14th UK, Europe, China Millimeter Waves and Terahertz Technology Workshop (UCMMT 2021), Lancaster University, UK, 2021, The 4th International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA 2020), Томск, 2020, The 5th International Conference Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA 2023), Москва, 2023, XXIV–XXVII Международные школы для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике Saratov Fall Meeting. International Symposium “Optics and Biophotonics”, Саратов, 2020-2023, XIII–XVII Всероссийские конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, 2018-2023, Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП), Саратов, 2018, Школы-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых», Саратов, 2018-2021, Школы для молодых ученых «Актуальные проблемы мощной вакуумной электроники СВЧ: источники и приложения», Нижний Новгород, 2019, 2023, XII Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур», Саратов, 2019 г., XIX и XX научные школы «Нелинейные волны», Нижний Новгород, 2020 г., 2022 г., XII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, 2022 г., XX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», Сочи, 2023.

Результаты диссертации использованы при выполнении НИР, поддержанных грантами РФФИ № 18-02-00839, РФФИ № 19-79-00307 и РФФИ № 22-22-00603.

По результатам диссертации опубликовано 25 работ, из них 6 статей в реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов диссертаций на

соискание ученой степени доктора и кандидата наук и индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 6 работ в трудах конференций, индексируемых в базах данных и системах цитирования Web of Science и/или Scopus, 13 работ в сборниках трудов всероссийских конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из Введения, трёх глав, Заключения и Списка литературы. Общий объем диссертации составляет 130 страниц, включая 48 рисунков. Список литературы состоит из 95 наименований на 11 страницах.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, научно-практическая значимость работы, сведения об апробации работы и основных публикациях автора, структуре работы.

В **первой главе** изучаются особенности синхронизации одномодовой модели гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля. В разделе 1.1 приведены основные уравнения нестационарной одномодовой теории гиротрона с фиксированной структурой поля. Распределение поля в резонаторе выбирается в виде гауссовой функции

$$f_0(\zeta) = \exp\left[-3(2\zeta/\zeta_L - 1)^2\right], \quad (1)$$

где  $\zeta$  и  $\zeta_L$  — безразмерные продольная координата и длина пространства взаимодействия соответственно.

Развита упрощенная модель гиротрона, в которой функция электронной восприимчивости, определяющая мгновенную мощность взаимодействия пучка с полем резонатора, предварительно рассчитывается при различных значениях амплитуды поля и расстройки циклотронного резонанса, а затем с помощью интерполяции полученных зависимостей выражается в виде функции этих двух параметров (см. рис. 1). Такой подход позволяет свести описание задачи к динамической системе с одной степенью свободы:

$$\begin{aligned} \frac{da}{d\tau} + a &= I_0 \operatorname{Re} \Phi_0(a, \Delta_H) a + 2F \cos \varphi, \\ \frac{d\varphi}{d\tau} + \Omega &= I_0 \operatorname{Im} \Phi_0(a, \Delta_H) - (2F/a) \sin \varphi. \end{aligned} \quad (2)$$

В (2) все переменные и параметры являются безразмерными:  $a$  — амплитуда колебаний,  $\varphi$  — разность фаз колебаний поля в резонаторе и внешнего сигнала,  $\tau$  — время,  $\Phi_0$  — комплексная электронная восприимчивость,  $\Delta_H$  — расстройка циклотронного резонанса,  $I_0$  — параметр, пропорциональный току пучка,  $F$  — амплитуда внешнего сигнала,  $\Omega$  — отстройка частоты внешнего воздействия от собственной частоты.

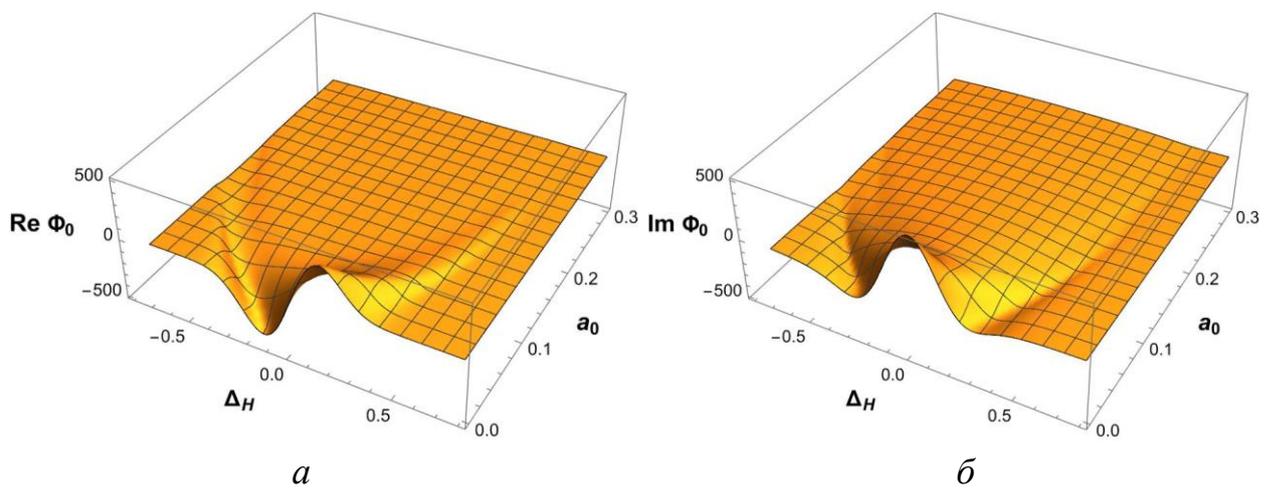


Рис. 1. Зависимости активной (а) и реактивной (б) электронной восприимчивости от амплитуды колебаний  $a_0$  и расстройки циклотронного резонанса  $\Delta_H$  при  $\mu = 15.0$  в гиротроне с гауссовой структурой ВЧ поля (1).

В разделе 1.2 проведен анализ устойчивости неподвижных точек системы (2). Получены соотношения, позволяющие найти условия бифуркации Андронова–Хопфа и седлоузловой бифуркации в зависимости от различных параметров. В контексте задачи о синхронизации генератора внешним гармоническим сигналом эти бифуркации соответствуют известным механизмам подавления (гашения) и захвата частоты.

В разделе 1.3 приводится подробная картина синхронизации данной системы при изменении параметров внешнего сигнала. Основное внимание уделяется ситуации, когда автономный гиротрон находится в режиме жесткого возбуждения, поскольку в этом случае достигается максимальный КПД. Построено семейство резонансных кривых, а также языки синхронизации на плоскости  $\Omega, F$ . Обсуждается трансформация этих зависимостей при различных значениях параметра  $I_0$ . Показано, что существует два типа устойчивых режимов: режимы синхронизации и режимы вынужденных колебаний с малой амплитудой, в которые превращается устойчивое нулевое решение автономной системы при подаче в резонатор внешнего сигнала.

На рис. 2а,б приведены типичные резонансные кривые и языки синхронизации в случае жесткого возбуждения для параметра тока, при котором в автономном гиротроне реализуется максимальный КПД. Область синхронизации закрашена серым, область вынужденных колебаний заштрихована. На рис. 2б линия  $SN$  образует два «языка», один из которых соответствует рождению седла и устойчивого узла на устойчивом цикле, второй — рождению седла и неустойчивого узла на неустойчивом цикле. Также на рис. 2 штриховыми линиями показаны состояния, отвечающие максимальному КПД.

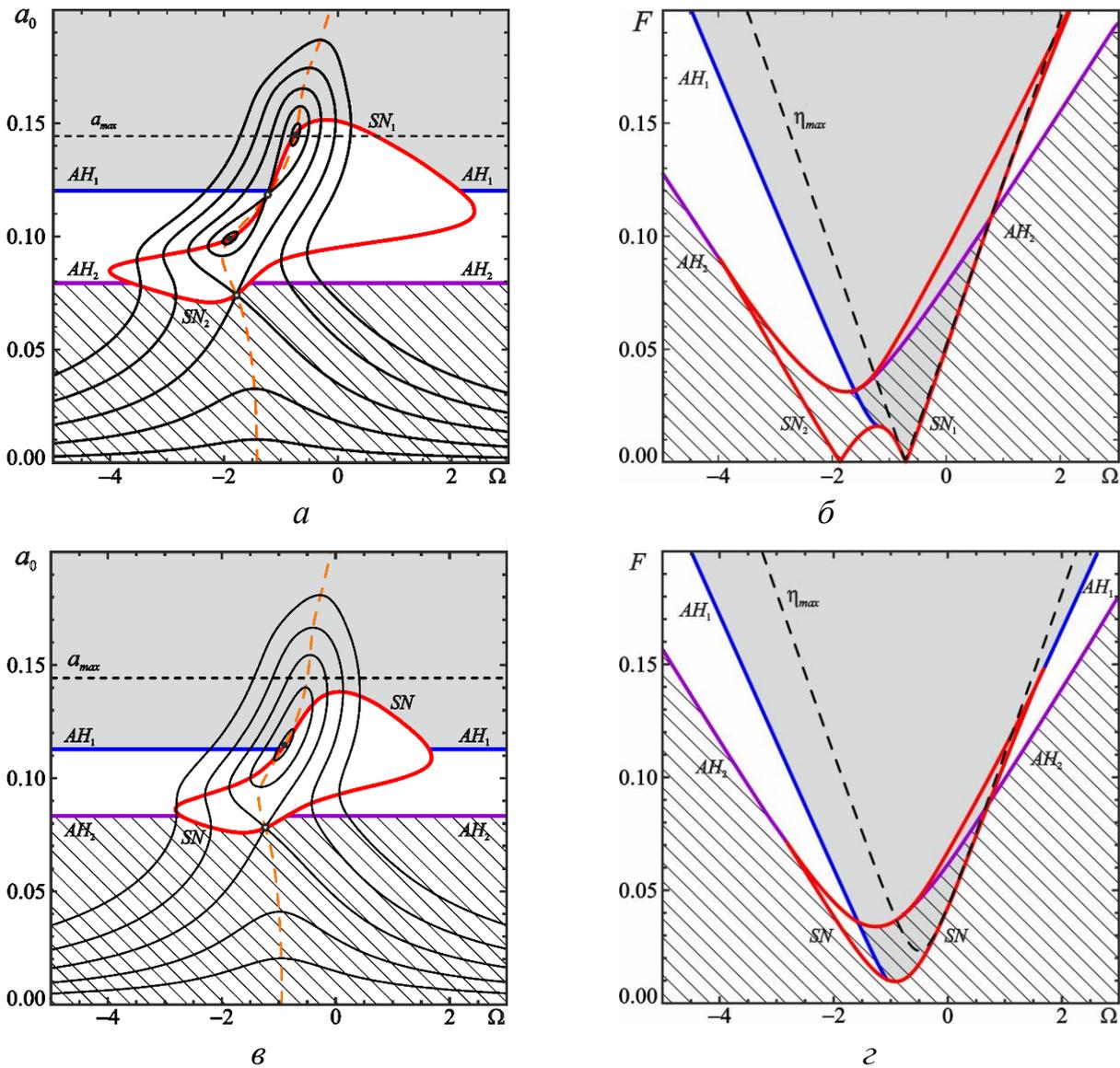


Рис. 2. Резонансные кривые при различных  $F$  (слева) и границы областей синхронизации (справа) при различных параметрах:  $a, б$  – когда в автономном гиротроне достигается максимальный КПД;  $в, г$  – в режиме регенеративного усиления. Красными линиями показаны границы седлоузловой бифуркации ( $SN_{1,2}$ ), синими и фиолетовыми — Андронова-Хопфа ( $AH_{1,2}$ ). Черной пунктирной линией отмечена линия максимального КПД. Серым цветом показана область синхронизации, заштрихована — область вынужденных колебаний.

Обсуждаются особенности работы гиротрона в режиме регенеративного усиления внешнего сигнала, когда ток находится ниже порога самовозбуждения, однако при воздействии внешнего сигнала возможно возбуждение колебаний, амплитуда которых почти так же велика, как и в режиме жесткого возбуждения. На рис. 2в,г приведены типичные резонансные кривые и языки синхронизации в этом случае. Вид резонансных кривых больше похож на случай мягкого возбуждения. Отметим, что, в отличие от рис. 2а,б, штриховая линия, отвечающая максимальному КПД, полностью лежит в области устойчивости синхронного режима. Таким образом, если

одновременно изменять и частоту, и мощность внешнего сигнала, двигаясь вдоль пунктирной линии на рис. 2б, можно реализовать режим с максимальным значением КПД и перестройкой частоты в пределах всей полосы синхронизации.

Построены фазовые портреты, иллюстрирующие сценарии перехода в режим синхронизации. В частности, помимо классических механизмов захвата и подавления частоты, установлению режимов синхронизации предшествуют сложные нелокальные бифуркации, отвечающие столкновению устойчивого и неустойчивого предельных циклов, а также рождению пары циклов из сгущения фазовых траекторий, либо рождению цикла из сепаратрисы седла. Отметим, что при частоте внешнего сигнала, близкой к собственной частоте автономного гиротрона, с увеличением амплитуды сигнала структура бассейнов притяжения трансформируется таким образом, что в определенном диапазоне начальной разности фаз колебаний гиротрона и внешнего сигнала фазовая траектория всегда стремится к особой точке, соответствующей режиму вынужденных колебаний, независимо от того, какова была начальная амплитуда. Такая ситуация, очевидно, неблагоприятна для синхронизации.

В разделе 1.4 проведен анализ режимов синхронизации при изменении расстройки циклотронного резонанса  $\Delta_H$  и безразмерного параметра тока  $I_0$ . Такая постановка задачи более характерна для теории гиротрона. Показано, что наиболее благоприятной с точки зрения синхронизации является ситуация, когда ток пучка снижен в 2-3 раза по сравнению со значением, при котором в автономном гиротроне достигается максимальный КПД. При этом воздействие внешним сигналом позволяет получить режимы синхронизации с КПД, близким к оптимальному, причем на плоскости параметров  $\Delta_H, I_0$  область режимов с высоким КПД располагается в области регенеративного усиления.

На рис. 3 приведен пример разбиения плоскости параметров на области различных режимов. В области I имеет место режим биений. В области II имеется единственный аттрактор — устойчивая особая точка. В основном в этой области амплитуда колебаний и КПД малы. Однако ниже линии седлоузловой бифуркации в области расстроек  $\Delta_H \approx 0.5 - 0.55$  реализуются устойчивые режимы с наиболее высоким КПД. Наиболее сложная ситуация имеет место в области IV, где существует устойчивая точка  $N_S$ , соответствующая режиму синхронизации, а также седло  $S$  и устойчивая точка  $O$ , отвечающая вынужденным колебаниям с малой амплитудой. Соответствующий фазовый портрет представлен на рис. 4а. Отметим, что бассейн притяжения точки  $N_S$  имеет структуру, которая обсуждалась выше, т.е. имеется область начальных фаз, из которой все траектории попадают в точку  $O$ .

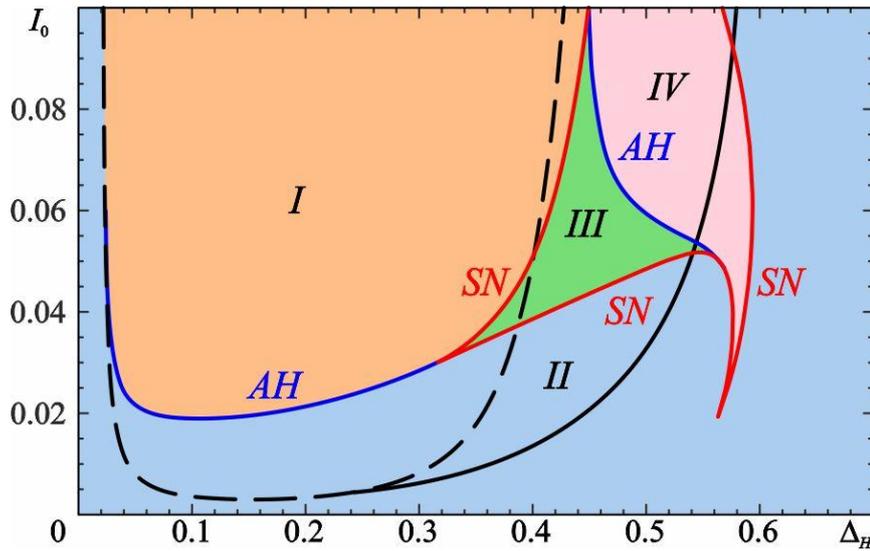


Рис. 3. Разбиение плоскости параметров  $\Delta_H$ ,  $I_0$  для неавтономного гиротрона при  $F = 0.05$ ,  $\Omega = -0.75$  на области различных режимов.  $SN$  — границы седлоузловой бифуркации,  $AH$  — границы бифуркации Андронова-Хопфа. Также показаны граница мягкого и жесткого возбуждения в автономном случае (черные штриховая и сплошная линии соответственно).

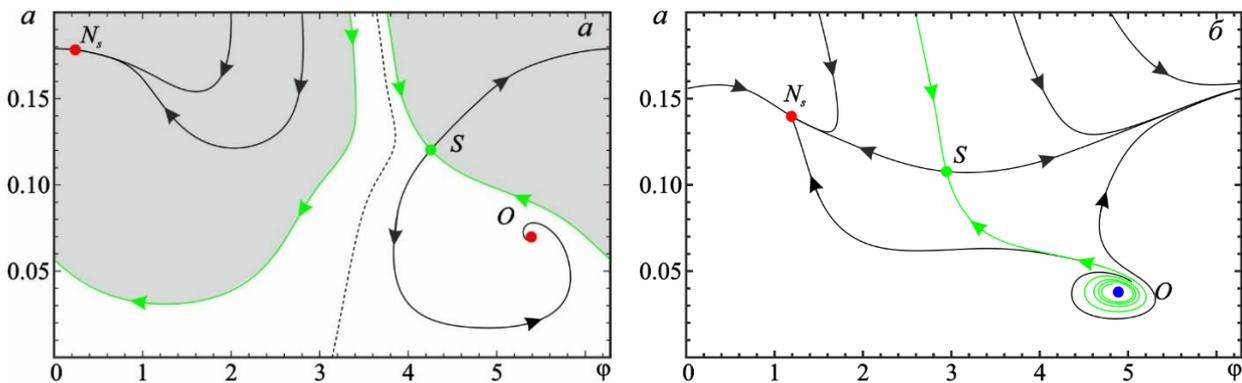


Рис. 4. Фазовые портреты при параметрах внешнего сигнала  $F = 0.05$ ,  $\Omega = -0.75$ ,  $I_0 = 0.07$ ,  $\Delta_H = 0.54$  (а) и  $\Delta_H = 0.465$  (б).

При переходе из области IV в область III точка  $O$  теряет устойчивость в результате бифуркации Андронова-Хопфа. Единственным аттрактором остается устойчивая точка  $N_s$  (см. рис. 4б). Теперь при любых начальных условиях (в том числе, при малой начальной амплитуде колебаний) устанавливается режим синхронизации.

Во **второй** главе обсуждается влияние паразитных мод на картину синхронизации. В разделе 2.1 приведены уравнения многомодовой теории гиротрона с фиксированной структурой поля. Рассматривается ситуация, когда спектр собственных мод близок к эквидистантному, что характерно для гиротронов со сверхразмерными резонаторами, где рабочими являются моды «шепчущей галереи». Раздел 2.2 посвящен описанию методики, которая используется для анализа устойчивости режима колебаний рабочей моды. В

случае многомодовых процессов непосредственное применение подхода, представленного в первой главе затруднительно, поскольку электронная восприимчивость зависит от амплитуд всех учитываемых мод, а также от разностей фаз между ними. Однако его можно использовать, если нас интересует лишь вопрос о зоне устойчивой генерации рабочей моды. В этом случае задача сводится к исследованию возбуждения различных паразитных мод, амплитуды которых считаются малыми, в присутствии установившихся колебаний рабочей моды. Методика такого анализа была предложена Г.С. Нусиновичем и соавторами<sup>11,12</sup>. В диссертации данная методика адаптирована с учетом влияния внешнего сигнала. Найдены условия нарастания паразитной моды в двухмодовой модели гиротрона с несинхронным взаимодействием мод, а также условия параметрической неустойчивости в многомодовой модели с эквидистантным спектром. Последняя обусловлена синхронным параметрическим взаимодействием трех мод, когда частоты и азимутальные индексы мод удовлетворяют соотношениям

$$2\omega_0 = \omega_+ + \omega_-, \quad 2m_0 = m_+ + m_-, \quad (3)$$

которые на квантовом языке обычно интерпретируют как законы сохранения энергии и углового момента импульса при четырёхфотонном параметрическом распаде двух квантов рабочей моды на кванты мод-сателлитов.

В разделе 2.3 исследуется структура зоны устойчивости рабочей моды на плоскости параметров  $\Delta_H, a_0$  и  $\Delta_H, I_0$  в автономном гиротроне при значениях параметра плотности спектра мод  $\Delta_0$ , характерных для современных гиротронов, используемых для нагрева плазмы. Показано, что область устойчивости рабочей моды имеет сложную конфигурацию и образуется границами возбуждения различных пар сателлитов, для которых безразмерные расстройки частот равны  $s\Delta_0$  ( $s = \pm 1, \pm 2, \dots$ ). В зависимости от параметра плотности спектра мод необходимо учитывать различное число пар сателлитов. На рис. 5а представлена зона устойчивости в случае  $\Delta_0 = 0.2$ , что примерно соответствует, в частности, гиротрону диапазона 170 ГГц с рабочей модой TE<sub>28,12</sub>, а на рис. 5б — в случае  $\Delta_0 = 0.1$ , что соответствует, например, гипотетическому гиротрону с рабочей модой TE<sub>56,24</sub><sup>13</sup>. Области устойчивости рабочей моды показаны серым цветом. Видно, что граница устойчивости состоит из нескольких участков, при пересечении которых происходит возбуждение тех или иных пар сателлитов. Для параметра  $\Delta_0 = 0.2$  это ближайшая пара сателлитов ( $s = \pm 1$ ) и следующая ( $s = \pm 2$ ). Остальные пары сателлитов, частоты которых лежат вне полосы циклотронного резонанса, не

<sup>11</sup>Зарницына И.Г., Нусинович Г.С. Об устойчивости одномодовых автоколебаний в гиромонотроне // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17, № 12. С. 1858-1867.

<sup>12</sup>Глявин М.Ю., Нусинович Г.С. Устойчивость одномодовых колебаний в гиротроне с синхронным взаимодействием мод // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36, № 3. С. 512-520.

<sup>13</sup>Bakunin V.L., Denisov G.G., Novozhilova Y.V. Principal enhancement of THz-range gyrotron parameters using injection locking // IEEE Electron Device Lett. 2020. Vol. 41. No. 5. P. 777-780.

влиять на конфигурацию области устойчивости. Более сложную структуру имеет область устойчивости для  $\Delta_0 = 0.1$ . Как видно из рис. 5б, в этом случае следует учитывать до четырех пар спутников. Размер области устойчивости уменьшается по сравнению с рис. 5а. Границы устойчивости для спутников с  $s=\pm 2$  и  $s=\pm 4$ , очевидно, совпадают с границами для  $s=\pm 1$  и  $s=\pm 2$  при  $\Delta_0 = 0.2$ . Видно, что режим с максимальным КПД в обоих случаях является неустойчивым.

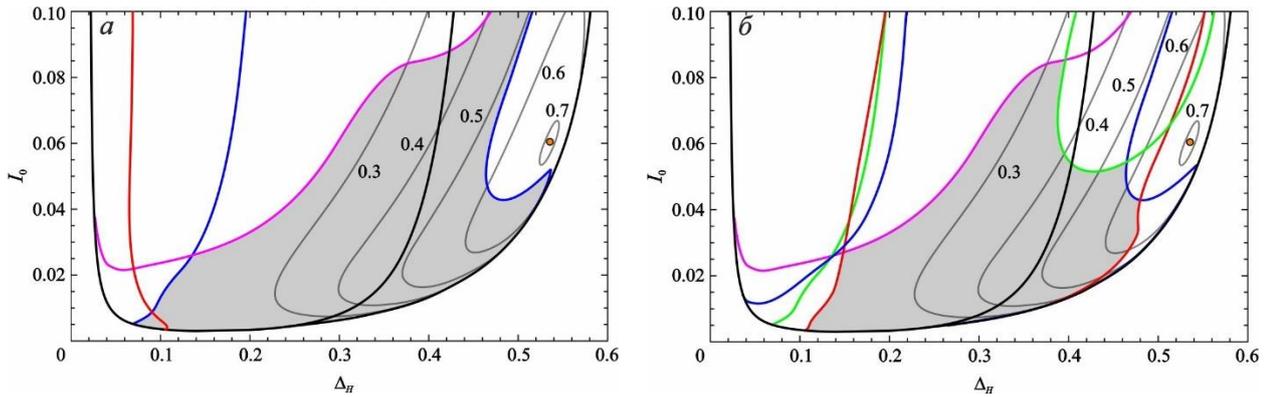


Рис. 5. *а* – область устойчивости рабочей моды в многомодовом гиротроне (серый цвет) при параметре плотности спектра мод  $\Delta_0 = 0.2$ . Показаны границы возбуждения мод с  $s=\pm 1$  (синий цвет) и  $s=\pm 2$  (фиолетовый). *б* – область устойчивости при параметре плотности спектра мод  $\Delta_0 = 0.1$ . Показаны границы возбуждения мод с  $s=\pm 1$  (красный цвет),  $s=\pm 2$  (синий),  $s=\pm 3$  (зеленый) и  $s=\pm 4$  (фиолетовый). Нанесены линии равного КПД, кружком показана точка максимального КПД.

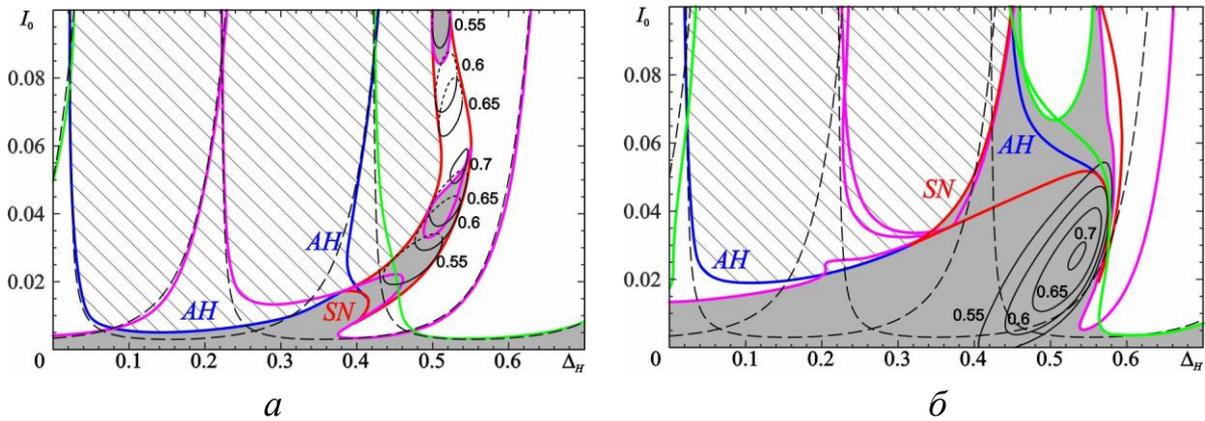


Рис. 6. Область устойчивости рабочей моды (серый цвет) неавтономного гиротрона при  $\Delta_0 = 0.2$ ,  $\Omega = -0.75$ ,  $F = 0.01$  (*а*) и  $F = 0.05$  (*б*). Заштрихована область биений. Штриховыми линиями показаны границы мягкого самовозбуждения для мод с номерами  $s = 0, \pm 1, \pm 2$ . Черными кривыми показаны линии равного КПД. Красными линиями показаны границы седлоузловой бифуркации (SN), синими — Андронова-Хопфа (AH). Фиолетовыми кривыми показаны границы, где происходит возбуждение моды с  $s = \pm 1$ , зелеными — возбуждение моды с  $s = \pm 2$ .

В разделе 2.4 исследуется структура зоны устойчивости в неавтономном случае. Рассмотрены случаи двухмодового несинхронного взаимодействия и трехмодового взаимодействия с эквидистантным спектром мод. Результаты подтверждают, что внешнее воздействие позволяет стабилизировать режим с максимальным КПД. Определены значения параметров, при которых режимы с высоким КПД реализуются в широкой полосе синхронизации по параметру  $\Delta_H$ , а возбуждение паразитных мод не оказывает существенного влияния на область устойчивости. Примеры областей устойчивости при двух различных значениях  $F$  приведены на рис. 6а,б. Видно, что при малой амплитуде внешнего воздействия режим с максимальным КПД неустойчив, при большой — устойчив.

Проведенный в главе 2 анализ позволяет уточнить структуру зоны устойчивости и значительно облегчает интерпретацию численных результатов, что в случае большого числа взаимодействующих мод является непростой задачей, в особенности в области, где имеет место мультистабильность и длительность переходных процессов велика. Также в главе приведены результаты численного моделирования на основе многомодовой нестационарной теории гиротрона, которые полностью согласуются с результатами теоретического анализа.

В третьей главе рассматривается задача о подавлении паразитных мод, возбуждающихся на фронте импульса ускоряющего напряжения, при помощи внешнего сигнала. В качестве конкретного примера рассматривается мощный гиротрон диапазона 250 ГГц с рабочей модой  $TE_{19,8}^{14}$ , для которого параметр плотности спектра мод  $\Delta_0 = 0.33$ . В разделе 3.1 с помощью методики, развитой в главе 2, проанализированы зоны устойчивости рабочей моды на плоскости параметров  $\Delta_H, I_0$  в автономном случае. При выбранном значении  $\Delta_0$  конфигурация области устойчивости рабочей моды определяется границами возбуждения ближайшей пары сателлитов (рис. 7а). В данном случае режим с максимальным КПД является устойчивым, однако при соответствующих параметрах имеет место бистабильность: помимо генерации рабочей моды устойчивым является трехмодовый режим, в котором максимальную амплитуду имеет низкочастотный сателлит. В разделе 3.2 представлены аналогичные результаты для неавтономного гиротрона. При воздействии внешним сигналом режимы с высокими значениями КПД устойчивы, причем они располагаются ниже линии седлоузловой бифуркации, т.е. вне области бистабильности (см. рис. 7б).

В разделе 3.3 исследуется, как на процессы конкуренции мод влияет выброс параметров на фронте импульса в процессе установления колебаний. Поскольку основную опасность представляет выброс напряжения, который

---

<sup>14</sup> Denisov G.G., Glyavin M.Y., Fokin A.P., Kuftin A.N., Tsvetkov A.I., Sedov A.S. First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics // Rev. Sci. Instrum. 2018. Vol. 89, No. 8. 084702.

приводит к изменению циклотронной частоты, ограничивались случаем, когда расстройка циклотронного резонанса меняется по закону

$$\Delta_H(\tau) = \Delta_{H0} \frac{1 + \alpha(\tau/\tau_0 - 1)\exp(1 - \tau/\tau_0)}{1 + \exp(1 - \tau/\tau_0)}, \quad (4)$$

где  $\Delta_{H0} = 0.53$  — значение, приблизительно соответствующее максимуму КПД, параметр  $\alpha$  регулирует максимальное значение расстройки, а параметр  $\tau_0$  — характерное время ее изменения. Если  $\tau_0 \gg 1$ , т.е. расстройка изменяется достаточно медленно, конкретное значение этого параметра не влияет на характер установившегося режима.

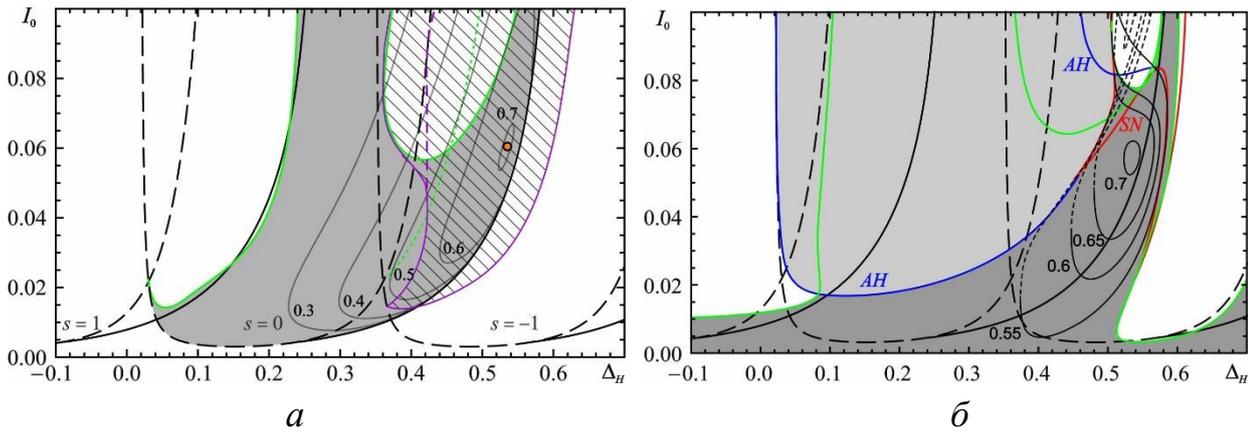


Рис. 7. Зона устойчивости рабочей моды на плоскости  $\Delta_H, I_0$  для автономного (а) и неавтономного (б) гиротрона ( $F = 0.05, \Omega = -1.41$ ). Штриховыми черными линиями показаны границы мягкого возбуждения, а сплошными — жесткого для мод  $s=0, \pm 1$ . Зелеными линиями показана граница, где возбуждаются  $s = \pm 1$  моды. Темно-серым цветом показана область одномодовой генерации рабочей моды, а светло-серым — область биений. На рис. (а) заштрихована область трёхмодового режима.

Выброс ускоряющего напряжения в ходе переходного процесса, который часто имеет место на практике, может привести к тому, что происходит срыв генерации рабочей моды. В процессе установления колебаний, т.е. после того, как ускоряющее напряжение (и, соответственно, расстройка циклотронного резонанса) возвращается к номинальному значению, мы последовательно проходим зоны генерации мод  $s=1$  и  $s=0$ , после чего происходит срыв генерации рабочей моды и установление трёхмодового режима, в котором доминирует амплитуда низкочастотного сателлита  $A_{-1}$  (рис. 8а). В этом режиме поперечный электронный КПД составляет порядка 30%. Воздействие внешним сигналом с достаточно большой мощностью (порядка 10% выходной мощности) позволяет существенно расширить зону устойчивости рабочей моды в область более высоких значений расстройки циклотронного резонанса. В результате выброс ускоряющего напряжения не приводит к выходу за границу зоны устойчивости, и после окончания переходного процесса и

выключения внешнего сигнала устанавливается стационарный режим с максимальным КПД (рис. 8б).

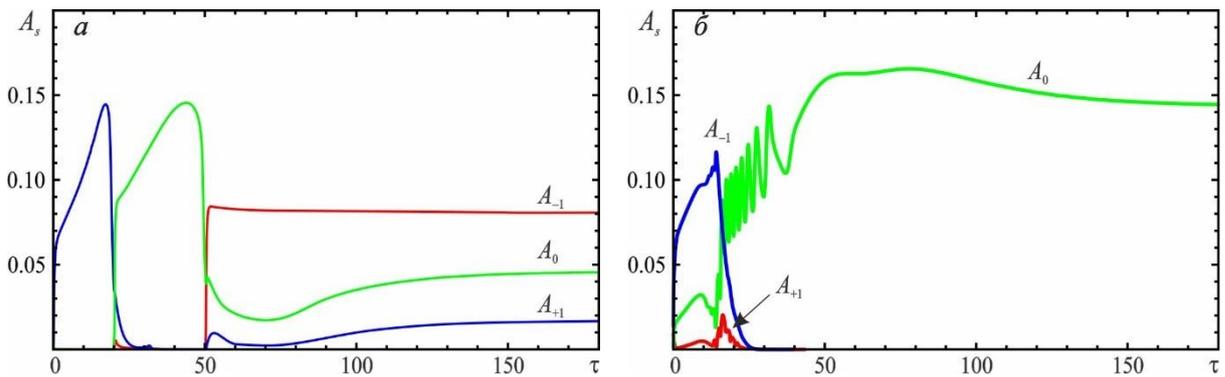


Рис. 8. Результаты численного моделирования процессов конкуренции мод с учетом медленного изменения расстройки циклотронного резонанса по формуле (4). Зависимости амплитуд мод в автономном гиротроне (а) и при воздействии внешнего сигнала с  $F = 0.05$ ,  $\Omega = -0.45\pi$  (б).

В **Заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации развита модель гиротрона с фиксированной структурой поля под воздействием внешнего гармонического сигнала, использующая интерполяцию предварительно рассчитанной электронной восприимчивости как функции амплитуды колебаний и расстройки циклотронного резонанса. Данная модель позволяет анализировать динамические режимы в зависимости от различных управляющих параметров, не прибегая к численному решению системы дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие электронного пучка с ВЧ полем в резонаторе гиротрона. С ее помощью построена достаточно полная картина синхронизации гиротрона внешним сигналом, включая анализ структуры зоны устойчивости в многомодовом гиротроне. Полученные результаты полностью согласуются с результатами численного моделирования на основе теории гиротрона с фиксированной структурой поля.

На основе развитой модели в диссертации были получены следующие основные результаты:

1. Подробно исследована синхронизация в ситуации, когда автономный гиротрон находится в режиме жесткого возбуждения. Показано, что в этом случае наблюдается мультистабильность: существует режим синхронизации с высоким КПД и режим вынужденных колебаний с малой амплитудой и низким КПД. Картина синхронизации качественно аналогична

представленной в работе<sup>15</sup> для упрощенной квазилинейной модели генератора с жестким возбуждением в случае большой неизохронности.

2. Показано, что установлению режимов синхронизации предшествует сложная последовательность бифуркаций, включая нелокальные бифуркации столкновения устойчивого и неустойчивого предельных циклов (либо цикла и инвариантного многообразия седла), а также бифуркации рождения пары циклов из сгущения фазовых траекторий, либо рождения цикла из сепаратрисы седла. При частоте внешнего сигнала, близкой к собственной частоте автономного гиротрона, в результате бифуркации исчезновения неустойчивого предельного цикла структура бассейнов притяжения трансформируется таким образом, что при определенных значениях параметров режим синхронизации оказывается чрезвычайно чувствительным к начальной фазе колебаний: существует диапазон начальных фаз, в котором фазовая траектория всегда стремится к особой точке, соответствующей режиму вынужденных колебаний, независимо от того, какова была начальная амплитуда.

3. Проанализирована устойчивость режимов синхронизации при изменении нормированного тока пучка  $I_0$  и расстройки циклотронного резонанса  $\Delta_H$ . Установлено, что в случае, когда рабочий ток значительно (в 2-3 раза) ниже того, при котором в автономном гиротроне достигается максимальный КПД, воздействие внешнего сигнала с мощностью, не превышающей 10% мощности генерации, позволяет получить режимы синхронизации с КПД, близкими к оптимальному, которые как правило наблюдаются в области регенеративного усиления. Также в этом случае режим синхронизации существует в широком диапазоне изменения расстройки циклотронного резонанса, сопоставимом с шириной зоны генерации автономного гиротрона.

4. Методика анализа автомодуляционной неустойчивости в гиротроне адаптирована на случай многомодового гиротрона, синхронизируемого внешним сигналом. С ее помощью построены границы области устойчивости на плоскости параметров  $\Delta_H, a_0$  и  $\Delta_H, I_0$  при различных значениях параметра плотности спектра мод  $\Delta_0$ , для случаев синхронного и несинхронного взаимодействия мод в автономном случае. Выявлена сложная конфигурация границы области устойчивости рабочей моды, которая образуется границами возбуждения различных пар сателлитов, причем в зависимости от параметра плотности спектра мод необходимо учитывать до четырех пар сателлитов. При типичных значениях параметра плотности спектра мод, характерных для современных мощных гиротронов со сверхразмерными резонаторами, режим с максимальным КПД является неустойчивым.

---

<sup>15</sup> Yakunina K.A., Kuznetsov A.P., Ryskin N.M. Injection locking of an electronic maser in the hard excitation mode // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22, No. 11. 113107.

5. Проведено аналогичное исследование для гиротрона, синхронизируемого внешним сигналом. Обнаружено, что зоны устойчивости режимов синхронизации на плоскости  $\Delta_H, I_0$  в случае двух- и трехмодового взаимодействия имеют сходную структуру, однако во втором случае зона устойчивости уменьшается. Увеличение амплитуды внешнего сигнала способствует подавлению паразитных мод и приводит к тому, что режим с максимальным КПД становится устойчивым. Такое поведение согласуется с результатами, представленными в литературе. При оптимальных параметрах, которые были найдены при исследовании синхронизации одномодовой модели, возбуждение сателлитов не оказывает существенного влияния на устойчивость режимов синхронизации рабочей моды в области высоких КПД. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования на основе уравнений многомодовой теории гиротрона с фиксированной структурой поля.

6. На примере гиротрона с параметрами, примерно соответствующими мощному гиротрону диапазона 250 ГГц для диагностики и нагрева плазмы, исследована возможность использования воздействия внешним сигналом для подавления паразитных мод, возникающих за счет выброса ускоряющего напряжения в ходе переходного процесса. В отличие от задачи о синхронизации, в данном случае воздействие внешним сигналом осуществляется лишь на начальном этапе, в процессе установления колебаний. В рамках трёхмодовой модели гиротрона с эквидистантным спектром мод показано, что воздействие внешним сигналом позволяет расширить область устойчивости рабочей моды и полностью подавить паразитные колебания при выбросе на фронте импульса напряжения. Требуемая мощность внешнего сигнала составляет примерно 10 % мощности генерации.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Григорьева Н.В. Исследование синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом на основе модифицированной квазилинейной теории // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2021. Т. 29, № 6. С. 905-914.
2. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В., Глявин М.Ю., Бакунин В.Л. Динамика многомодовых процессов на фронте импульса ускоряющего напряжения в гиротроне при воздействии внешнего сигнала // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63. №5-6. С. 422-433.
3. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. Исследование синхронизации гиротрона в режиме жёсткого возбуждения на основе модифицированной квазилинейной модели // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 5. С. 406–419.
4. Адилова А.Б., Григорьева Н.В., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М. Теоретический анализ устойчивости одномодового режима генерации в гиротроне // Изв. вузов. Радиофизика. 2023. Т. 66, № 2. С. 161–175.
5. Григорьева Н.В., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М. Теоретический анализ синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом // ЖТФ. 2024. Т. 94, № 3. С. 507-514.
6. Адилова А.Б., Преображенская (Григорьева) Н.В., Рыскин Н.М. К теории синхронизации двухмодового электронного мазера с жестким возбуждением // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, № 1. С. 19–27.
7. Melnikova M.M., Grigorieva N.V., Ryskin N.M. Influence of reflected or external signal on gyrotron operation // Proc. SPIE. Vol. 11582, Fourth International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications. Art. no. 115820M. DOI:10.1117/12.2580073.
8. Novozhilova Y.V., Bakunin V.L., Preobrazhenskaya (Grigorieva) N.V., Ryskin N.M., Leshova K.A., Manuilov V.N., Glyavin M.Y. Pulsed gyrotron start-up scenario in presence of voltage/current surge front // 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019). Paris, France. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874116.
9. Grigorieva N.V., Ryskin N.M. Study of injection locking of a gyrotron by using the modified quasilinear theory // 14th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT 2021) Lancaster, UK. DOI: 10.1109/UCMMT53364.2021.9569876.
10. Grigorieva N.V., Adilova A.B., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Study of mode-competition processes in a high power multimode gyrotron using modified quasilinear model // 24th International vacuum electronics conference, April 26-28 2023, Chengdu, China, DOI: 10.1109/IVEC56627.2023.10157624.
11. Adilova A.B., Melnikova M.M., Preobrazhenskaya (Grigorieva) N.V., Ryskin N.M. Influence of mode competition on synchronization in a gyrotron. 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018. 2018. С. 201-205. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542250.
12. Adilova A.B., Melnikova M.M., Preobrazhenskaya (Grigorieva) N.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Influence of mode competition on phase locking in gyrotrons // 7th International Workshop on Far-Infrared Technol. 2019 (IW-FIRT 2019). March 5-6, 2019, Fukui, Japan. P. 48.
13. Grigorieva N.V., Adilova A.B., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Theoretical analysis of the nonlinear dynamics of the gyrotron based on a modified quasi-linear model // The 5-th International Conference “Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications” (TERA-2023), 27 February – 2 March 2023, Moscow, Russia, p. 135. DOI: 10.59043/9785604953914\_135.
14. Григорьева Н.В., Новожилова Ю.В., Рыскин Н.М. Теоретический анализ синхронизации гиротрона в режиме жесткого возбуждения под действием внешнего сигнала // Диагностика высокотемпературной плазмы. Тезисы докладов XX

- Всероссийской конференции. 18–22 сентября 2023 г. Сочи: Изд-во АО «Т8 Издательские технологии», 2023. С. 284-286.
15. Преображенская (Григорьева) Н.В., Рыскин Н.М., Глявин М.Ю., Новожилова Ю.В. Влияние внешнего сигнала на процессы установления колебаний в многомодовом гиротроне. // XII Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур», 1–6 октября 2019 г. Саратов. С. 92.
  16. Преображенская (Григорьева) Н.В., Рыскин Н.М. Исследование влияния внешнего сигнала на работу многомодового гиротрона // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тезисы докладов XIV конференции молодых ученых. 17–19 сентября 2019 г. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2019. С. 194-195.
  17. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. Исследование синхронизации гиротрона внешним сигналом на основе модифицированной квазилинейной теории // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тезисы докладов XV конференции молодых ученых. 8 – 10 сентября 2020 г. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2020. С. 69-70.
  18. Григорьева Н.В., Модифицированная квазилинейная модель под воздействием внешнего сигнала // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тезисы докладов XVI конференции молодых ученых. 7 – 9 сентября 2021 г. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2021. С. 32 -33.
  19. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. Теоретический анализ устойчивости колебаний рабочей моды в многомодовом гиротроне // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тезисы докладов XVII конференции молодых ученых. 13 – 15 сентября 2022 г. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2022. С. 63 - 64.
  20. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. Теоретический анализ синхронизации гиротрона при воздействии внешнего гармонического сигнала // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тезисы докладов XVIII конференции молодых ученых. 12–13 сентября 2023 г. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2023. С. 52-53.
  21. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. Исследование синхронизации гиротрона внешним сигналом на основе модифицированной квазилинейной теории // XIX научная школа «Нелинейные волны–2020», 29 февраля – 6 марта 2020 г. Нижний Новгород. С. 91.
  22. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. Бифуркационный анализ режимов синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом // XX научная школа «Нелинейные волны–2022», 7 – 13 ноября 2022 г. Нижний Новгород. С. 72-73.
  23. Адилова А.Б., Григорьева Н.В., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М. Теоретический анализ нелинейной динамики гиротрона на основе модифицированной квазилинейной модели // XX научная школа «Нелинейные волны–2022», 7 – 13 ноября 2022 г. Нижний Новгород. С. 224-225.
  24. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. Исследование синхронизации гиротрона внешним сигналом на основе модифицированной квазилинейной теории // Материалы XXIX Всероссийской научной конференции «Нелинейные дни для молодых» 26–29 апреля 2021, Саратов. Вып. 29. С. 78-79.
  25. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. Исследование синхронизации гиротрона внешним сигналом на основе модифицированной квазилинейной модели // Тезисы докладов XII всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн и IV школы для молодых ученых «Актуальные проблемы мощной вакуумной электроники СВЧ: источники и приложения». 28 февраля – 4 марта 2022 г. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2022. С. 32-33.