

На правах рукописи



НОВОЖИЛОВА Юлия Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И СТАБИЛИЗАЦИЯ
ЧАСТОТЫ МОЩНЫХ ГИРОТРОНОВ ПРИ
ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО СИГНАЛА**

Специальность: 1.3.4 – радиофизика

Новожилова Юлия Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ
МОЩНЫХ ГИРОТРОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО
СИГНАЛА**

Автореферат

Подписано к печати 10.06.2024 Формат 60 × 90_{1/16}.
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л.
1,75. Тираж 100 экз. Заказ № 135.

Отпечатано в типографии Палитра - НН,
603950, Н.Новгород, ул. Минина 25а

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Официальные
оппоненты:

Лукша Олег Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (г. Санкт-Петербург)

Кудрин Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой электродинамики радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского (г. Нижний Новгород)

Аржанников Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор кафедры физики плазмы физического факультета Новосибирского государственного университета (г.Новосибирск)

Ведущая организация:

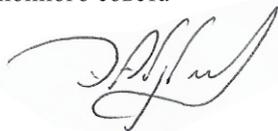
ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук (г. Москва)

Защита состоится «14» октября 2024 года в 15:00 на заседании Диссертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте rfpa.ru ФБГНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Автореферат разослан « 02 » сентября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук



Абубакиров Э.Б.

79. В.Е.Запечалов, Г.С.Нусинович. К теории амплитудно-фазового взаимодействия мод в электронных лазерах // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 3. С. 347-355.
80. А.Б.Адилова, Н.В.Григорьева, А.Г.Рожнев, Н.М.Рыскин. Теоретический анализ устойчивости одномодового режима генерации в гиротроне // Известия вузов. Радиофизика. 2023. Т. 66, № 2/3. С. 161-175.
81. А.Пиковский, М.Розенблум, Ю.Куртс. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. -493с.
82. G.S.Nusinovich, O.Dumbrajs. Technical noise in gyrokystrons and phase-locked gyrotron oscillators // Phys. Plasmas. 1997. V. 4, no. 5. P. 1424-1433. doi: 10.1063/1.872317
83. G.S.Nusinovich, O.V.Sinitsyn, V.L.Granatstein, A.N.Vlasov. Phase sensitivity of relativistic gyrotrons to voltage deviation // AIP Conference Proceedings. 2006. doi:10.1063/1.2409156
84. P.V.Krivoshchev, V.K.Lygin, V.N.Manuilov, Sh.E.Tsimring. Numerical simulation models of forming systems of intense gyrotron helical electron beams // Int. J. Infrared Milli. Waves. 2001. V. 22, no. 8. P. 1119-1145. doi: 10.1023/A:1015006230396
85. O.Dumbrajs, T.Saito, Y.Tatematsu, Y.Yamaguchi. Influence of the electron velocity spread and the beam width on the efficiency and mode competition in the high-power pulsed gyrotron for 300 GHz band collective Thomson scattering diagnostics in the large helical device // Phys. Plasmas. 2016. V. 23, no. 9. 093109. doi: 10.1063/1.4962575
86. E.M.Khutoryan, O.Dumbrajs, G.S.Nusinovich, T.Idehara. Theoretical study of the effect of electron beam misalignment on operation of the gyrotron FU IV A // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2014. V. 42, no. 6. P. 1586-1593. doi:10.1109/tps.2014.2322674
87. O.Dumbrajs, K.A.Avramidis, J.Franck, J.Jelonnek. On the dependence of the efficiency of a 240 GHz high-power gyrotron on the displacement of the electron beam and on the azimuthal index // Phys. Plasmas. 2014. V. 21, no. 1. Art. 013104. doi:10.1063/1.4862446
88. Д.П.Мартыненко, Р.В.Хохлов. О захватывании автогенератора амплитудно-модулированной внешней силой // Радиотехника и электроника. 1957. №8. С.1001-1011.
89. В.П.Яковлев. Синхронизация автогенератора слабomodулированной внешней силой // Радиотехника и электроника. 1961. №10. С.1609-1616.
90. Р.А.Грановская, Л.И.Телятников. Магнетронные генераторы и импульсные модуляторы: Учебное пособие. – М., МАИ, 1985, -52с.
91. Ю.И.Неймарк. D-разбиение пространства квазиполиномов. (К устойчивости лиnearизованных распределенных систем) //Прикладная математика и механика. 1949. Т.3, № 4. С.349.
92. Y. Vukov, et al. 24–84-GHz gyrotron systems for technological microwave applications // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32, no. 1. P. 67–72.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

В настоящее время важнейшими приложениями гиротронов мегаваттного уровня мощности на частотах до 170ГГц являются нагрев и диагностика плазмы, а также управление током в больших токамаках и стеллараторах, самым крупным из которых является проект ITER (Международный экспериментальный термоядерный реактор) [1-4]. Планируются к разработке токамаки нового поколения, такие как ДЕМО (Демонстрационный проект электростанции, использующей термоядерный синтез) [5,6], для которых требуется существенное повышение мощности и частоты гиротронов. Однако обеспечить одномодовую генерацию при оптимальных ведущих магнитных полях в субмиллиметровом диапазоне на мегаваттном уровне мощности из-за сгущения спектра мод и возбуждения паразитных мод может оказаться проблематичным и даже невозможным [7,8]. Другой проблемой при использовании гиротрона для ряда современных приложений является нестабильность частоты излучения, возникающая в результате шумов источника питания, нагрева резонатора или изменения величины провисания потенциала из-за частичной компенсации заряда электронного пучка ионами остаточных газов [9-11].

Для того, чтобы обеспечить одномодовую генерацию гиротронов со стабильной частотой используются различные методы селекции [3,12] и специальные сценарии включения для подавления паразитных мод [13-15], а также стабилизация частоты с помощью фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [10, 16-19]. На основе ФАПЧ в ИПФ РАН было получено рекордное значение ширины линии ~1 Гц для гиротрона с частотой 0.263 ТГц и мощностью 100 Вт [10]. Однако использование ФАПЧ трудно осуществимо в мощных мегаваттных гиротронах, поскольку требуется сложная дополнительная схема, особенно при управлении ускоряющим высоким напряжением. Применение специальных сценариев включения гиротронов не позволяет получить мегаваттный уровень мощности при переходе в субмиллиметровый диапазон. Более перспективными способами стабилизации частоты и обеспечения устойчивых одномодовых колебаний в гиротронах с мегаваттным уровнем мощности представляются захват фазы и частоты колебаний внешним монохроматическим сигналом или воздействие отраженной волны. Захват частоты мощного гиротрона внешним сигналом имеет ряд дополнительных преимуществ по сравнению с другими методами стабилизации частоты. Это повышение мощности излучения за счет подавления паразитных мод и продвижения в область оптимальных параметров, увеличение полосы перестройки частоты и возможность захвата частоты большого числа гиротронов для создания в перспективе комплекса когерентно излучающих источников [1*-6*].

Стабильные или управляемые по частоте источники излучения с высокой мощностью в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне представляют интерес для диагностики плазмы, в том числе на основе коллективного томсоновского рассеяния, подавления плазменных неустойчивостей, плазменных экспериментов [20-24]. Комплексы когерентно излучающих гиротронов в перспективе могут использоваться для управления токами в больших установках УТС (управляемого термоядерного синтеза), беспроводной передачи данных и энергии на большие расстояния [25,26] и ускорения частиц укороченными импульсами излучения терагерцового диапазона [27,28].

До недавнего времени методы стабилизации частоты при воздействии внешнего или отраженного сигнала были недоступны для мощных гиротронов, в которых традиционно используется однонаправленный квазиоптический преобразователь для вывода излучения на рабочей моде в виде гауссова пучка [2,29,30]. В таком преобразователе ввод внешнего или отраженного сигнала возможен только в виде моды со встречным направлением вращения полей относительно рабочей моды [31,32]. Это препятствие было преодолено после разработки и создания синтезированного двунаправленного преобразователя, обеспечивающего эффективный ввод внешнего сигнала в пространство взаимодействия гиротрона в виде рабочей моды и пространственное разделение входного и выходного сигналов [33].

Степень разработанности темы

Создание двухканального преобразователя инициировало активные теоретические исследования воздействия внешнего и отраженного сигнала на режимы генерации мощных гиротронов [34-45], включая цикл работ автора [1*-32*], составивший основу данной диссертации. Были получены результаты, демонстрирующие преимущества режима захвата частоты внешним сигналом по сравнению с автономным режимом генерации гиротрона [1*-6*, 34-39]. Показано, что внешний сигнал, относительная мощность которого составляет несколько процентов, может захватить частоту гиротрона субмиллиметрового диапазона. При этом даже в случае высоких индексов рабочей моды ($TE_{56,24}$) и плотного спектра мод, за счет подавления паразитных мод внешним сигналом возможна одномодовая генерация со стабильной частотой и необходимым для приложений мегаваттным уровнем мощности [1,6*].

Полученные диссертантом теоретические результаты были использованы при планировании в ИПФ РАН первых экспериментальных исследований захвата частоты гиротронов мегаваттного уровня мощности внешним сигналом (с использованием двухканального преобразователя) [38,7*-9*] и стабилизации частоты 28 ГГц технологического гиротрона с прямым выводом излучения при воздействии запаздывающей отраженной волны [10*-13*,40]. Результаты первых экспериментов по захвату частоты мощных гиротронов с рабочими частотами 35 ГГц и 170 ГГц внешним сигналом соответственно от магнетрона и от гиротрона-драйвера полностью подтвердили тео-

59. М.И. Балакин, Н.М. Рыскин. Мультистабильность и сложные колебательные режимы в генераторе с запаздывающим отражением от нагрузки // Письма в ЖТФ. 2019. Т.45, № 6. С. 33-35.
60. H.Li, N.B.Abraham. Analysis of the noise spectra of laser diode with optical feedback from a high-finesse resonator // IEEE J. Quantum Electron. 1989. V. 25, no.8. P.1782-1793.
61. N.M.Kondratiev, V.E.Lobanov, A.E.Shitikov, et al. Recent advances in laser self-injection locking to high- Q microresonators // Front. Phys. 2023. V. 18. 21305. doi:10.1007/s11467-022-1245-3
62. В.Я. Носков, К.А.Игнатков. Шумовые характеристики автодинов со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 9. С. 905–918.
63. И.П.Половков. Стабилизация частоты генераторов СВЧ внешним объемным резонатором. / М., Сов. Радио, 1967. -192с.
64. И.М.Иванов, Н.И.Скрипкин, А.В.Шмелев. Стабилизация частоты импульсных магнетронов W-диапазона. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1. С. 131-134.
65. G.M.Kazakevitch, Y.U.Jeong, V.M.Pavlov, B.C.Lee. Stabilization of the microtron-injector for a wide-band compact FIR FEL // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2004. V. A528. P. 115.
66. H.R.Jory. Network for pulling a microwave generator to the frequency of its resonant load. US3714592A, 1973.
67. П.С.Ланда. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ».2010. -360с.
68. Л.А.Вайнштейн. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь. 1988. -440с.
69. G.S.Nusinovich, O.Dumbrajs. Field formation in the interaction space of gyrotrons//J Infrared Milli Terahz Waves. 2015. V. 37, no. 1. P. 111–122. doi:10.1007/s10762-015-0192-2
70. М.И.Рабинович, Д.И.Трубецков. Введение в теорию колебаний и волн. — НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2000. -560 с.
71. А.П.Кузнецов, С.П.Кузнецов, Н.М.Рыскин. Нелинейные колебания. М.:Физматлит. 2005.-292с.
72. М.А.Моисеев, Г.С.Нусинович. К теории многомодовой генерации в гиромонотроне // Известия вузов. Радиофизика. 1974. Т.17, №11. С.1709-1717.
73. G.S.Nusinovich. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press. 2004. 335p.
74. Ш.Е.Цимринг. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Н.Новгород: ИПФ РАН - 576 с.
75. Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М., Петелин М.И., Рогачева Г.Г. Открытые резонаторы в виде волноводов переменного сечения. – Изв. ВУЗов. Радиофизика. Т.12, N 8, с.1236. 1969
76. Б.З.Каценеленбаум. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: АН СССР. 1961. -216с.
77. Н.И.Зайцев, С.А.Запечалов, А.В.Мальгин, М.А.Моисеев, А.С.Шевченко. Исследование сценария включения мощного импульсного гиротрона с релятивистским электронным пучком // Изв. Вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 3. С. 196–199.
78. В.И.Гапонов. Электроника. Т.1,2. М.: Физматлит, 1960.

42. M.M.Melnikova, N.M.Ryskin. Influence of reflections on mode-competition processes in a high-power multimode gyrotron // *Phys. Plasmas* . 2022. V. 29, no.1. 013104. doi:10.1063/5.0071210
43. N.Kharchev, A.Cappa, D.Malakhov, J.Martinez, E.Konchekov, A.Tolkachev, V.Borzosekov, K.Sarksyan, M.Petelin. Influence of controlled reflected power on gyrotron performance // *J Infrared Milli Terahz Waves*. 2015. V. 36. P. 1145–1156.
44. E.M.Khutoryan, T.Idehara, M.M.Melnikova, N.M.Ryskin, O.Dumbrajs. Influence of reflections on frequency tunability and mode competition in the second-harmonic THz gyrotron // *J Infrared Milli Terahz Waves*. 2017. V. 37, no. 7. P. 824–837. doi: 10.1007/s10762-017-0378-x
45. I.V.Zotova, G.G.Denisov, N.S.Ginzburg, A.S.Sergeev, R.M.Rozental. Time-domain theory of low-Q gyrotrons with frequency-dependent reflections of output radiation // *Phys. Plasmas*. 2018. V. 25, no. 1. 013104. doi:10.1063/1.5008666
46. В.С.Ергаков, М.А.Моисеев, В.И.Хижняк. К теории синхронизации МЦР-монотрона // *Радиотехника и электроника*. 1978. Т. 23, № 12. С. 2591-2599.
47. В.С.Ергаков, М.А.Моисеев. К теории синхронизации МЦР-монотрона внешним сигналом // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1975. Т. 18, № 1. С. 120-131.
48. Г.С.Нусинович. Об эффективности методов нелинейной селекции мод в МЦР-генераторах // *Радиотехника и электроника*. 1977. Т. 22, № 10. С.2214-2216.
49. A.W.Flifflet, W.M.Manheimer. Nonlinear theory of phase-locking gyrotron oscillators driven by an external signal // *Phys. Rev. A*. 1989. V. 39, no. 7. P. 3432-3443.
50. M.E.Read, R.Seeley, W.M.Manheimer. Observations of phase locking in a single-cavity gyrotron oscillator// *IEEE Trans on Plasma Sci*. 1985. V.13, no. 6. P. 398-403.
51. H.Guo, D.J.Hoppe, J.Rodgers, ... G.S.Nusinovich. Phase-locking of a second-harmonic gyrotron oscillator using a quasi-optical circulator to separate injection and output signals // *IEEE Trans on Plasma Sci*. 1995. V.23, no. 5. P. 822-832.
52. T.M.Antonsen, S.Y.Cai, G.S.Nusinovich. Effect of window reflection on gyrotron operation // *Phys. Fluids B, Plasma Phys*. 1992. V. 4, no. 12. P.4131–4139. doi: 10.1063/1.860320
53. A.Grudiev, J.Jelonnek, K.Schünemann. Time-domain analysis of reflections influence on gyrotron operation // *Phys. Plasmas*. 2001. V. 8, no. 6. P. 2963–2973. doi: 10.1063/1.1366330
54. Н.С.Гинзбург, М.Ю.Глявин, Н.А.Завольский, В.Е.Запечалов, М.А.Моисеев, Ю.В.Новожилова. Использование отражения с запаздыванием для получения автомодуляционных и стохастических режимов генерации в гиротронах миллиметрового диапазона // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 24, № 11. С. 53-59.
55. M.Y.Glyavin, V.E.Zapevalov, A.N.Kuftin, A.G.Luchinin. Experimental study of the output radiation spectrum of a gyrotron with partial reflection of the output signal // *Radiophys. Quantum Electron*. 2000. V. 43, no. 5. P. 396–399. doi: 10.1007/BF02677156
56. O.Dumbrajs, M.Yu.Glyavin, V.E.Zapevalov, N.A.Zavolsky. Influence of reflections on mode competitions in gyrotrons // *IEEE Trans. Plasma Sci*. 2000. V. 28, no. 3. P. 588-596.
57. G.Gantenbein, E.Borie, G.Dammertz, M.Kuntze, H.-U.Nickel, B.Piosczyk, M.Thumm. Experimental results and numerical simulations of a high power 140 GHz gyrotron // *IEEE Trans. Plasma Sci*. 1994. V. 22, no. 5, P. 861–870. doi: 10.1109/27.338301.
58. П.С. Ланда. *Нелинейные колебания и волны*. М.: Наука. Физматлит. 1997. 496с.

ретические расчеты, выполненные диссертантом. Так, для гиротрона на частоте 170 ГГц – прототипа гиротрона для ITER – экспериментально подтверждено увеличение мощности излучения на 11% и увеличение вдвое ширины полосы генерации на рабочей моде в режиме захвата частоты. В экспериментах по воздействию отраженной волны с коэффициентом отражения по мощности 10% в полном соответствии с теоретическими предсказаниями удалось уменьшить интервала изменения частоты излучения по сравнению с гиротроном без отражений: в полтора раза в случае нерезонансного отражателя и почти на порядок при отражении от внешнего высокочастотного квазиоптического резонатора (с добротностью 30000, существенно превышающей добротность резонатора гиротрона).

Обращаясь к истории исследований воздействия внешнего сигнала на режимы генерации гиротрона, следует отметить, что первые работы по этой тематике появились несколько десятков лет назад [46-51]. В [46,47] были феноменологически записаны уравнения гиротрона с поступающей из выходного волноводного тракта волной для случая слабого (по сравнению с полем излучения) внешнего воздействия. Был исследован захват частоты излучения монохроматическим внешним сигналом, найдены границы областей различных режимов генерации [46,47] и предсказано, что захват частоты внешним сигналом должен способствовать подавлению паразитных мод [48]. Была предпринята попытка вывода уравнений возбуждения полей гиротрона внешним сигналом произвольной величины, однако это было сделано некорректно из-за неправильного описания связи полей в выходном волноводе и пространстве взаимодействия гиротрона [49]. Были проведены эксперименты по захвату внешним сигналом частоты гиротронов с уровнем мощности порядка нескольких десятков киловатт на рабочей частоте 35 ГГц с симметричной рабочей модой [50,51], при этом осуществлялся прямой ввод-вывод мощности. Следует отметить, что в ранних работах воздействие внешнего сигнала рассматривалось для простых одномодовых и двухмодовых моделей [46,47]. В современных работах рассматривается конкуренция большого числа мод и подавление паразитных мод при захвате частоты [1*-6*, 14*-19*, 35-37].

Режимы генерации гиротрона при воздействии отражения от удаленной нерезонансной нагрузки также вызвали интерес на протяжении последних десятилетий [52-57] и являются предметом активных исследований в настоящее время [34,40-44,4*,10*,11*,20*-29*,33*-39*]. До недавнего времени воздействие отражения представлялось нежелательным эффектом, приводившим к усложнению режима генерации и переходу от стационарной генерации к периодической и хаотической автомодуляции [43,52-55,37*-39*] или возбуждению паразитных поперечных мод [56,57]. Однако при определенном выборе параметров – достаточно малой величине коэффициента отражения и большом времени запаздывания – возможна стационарная генерация [§15.2 в 58,59], при этом частота излучения может быть стабилизирована [34,40-42,4*,10*,11*,20*-26*]. Кроме того, воздействие отраженной волны может

увеличить интервал перестройки частоты генерации в результате возбуждения продольных мод высокого порядка в резонаторе гиротрона [44], что представляет интерес при использовании гиротронов в спектроскопии. В большинстве теоретических [34,4*,20*-24*] и экспериментальных [40,41,10*,11*] исследований по стабилизации частоты излучения гиротрона отражённой волной рассматривается гиротрон с одной поперечной модой резонатора. Однако в мощных гиротронах, работающих на модах высокого порядка, конкуренция поперечных мод может существенно повлиять на режим генерации [7,8,1*-6*,14*-19*,40*,41*]. При отражении конкуренция мод эквидистантного спектра в мощном гиротроне исследована в [26*].

Стабилизация частоты при воздействии волны, отраженной от внешнего высокочастотного резонатора с оптимально подобранной фазой запаздывания, много десятилетий широко применяется для лазеров [60,61], микроволновых электронных генераторов [62-66], в частности, при использовании магнетронов в микроволновых ускорителях. Однако эксперименты по стабилизации частоты гиротрона с помощью этого метода до недавнего времени не проводились. Возможные сложности на пути проведения таких экспериментов, кроме указанной выше проблемы с трансформацией отраженной волны в рабочую моду гиротрона на выходном преобразователе, связаны с изменением частот резонатора гиротрона и внешнего стабилизирующего резонатора из-за нагрева. В результате внешний отражатель может выйти из резонанса с гиротроном. Недавно эти сложности были преодолены, и в ИПФ РАН впервые получено экспериментальное подтверждение данного метода стабилизации частоты для гиротрона [12*]. В эксперименте использована оригинальная схема с внешним квазиоптическим резонатором, в котором нагрев и уход частоты сказывается меньше, чем в резонаторе, встроенном в волноводный выходной тракт [13*]. Следует отметить, что теоретические исследования данного метода стабилизации частоты генераторов различного типа ранее проводились лишь для конкретных радиотехнических или оптических схем [60,63]. Теория для произвольного автогенератора была построена без учета запаздывания, что приводило к отсутствию эффективной стабилизации частоты [67]. Можно провести некоторую аналогию процесса стабилизации частоты отражением от внешнего резонатора с известным в теории колебаний эффектом затягивания частоты при взаимодействии двух колебательных систем с изменяющимися параметрами, когда зависимость нормальных частот колебаний от разности частот контуров при их сильной связи описывается графиком Вина [67,70]. Для стабилизации частоты связь генератора с внешним контуром (величина коэффициента отражения) должна быть слабой, так что кривые на графике Вина сливаются, и при высокой добротности внешнего контура образуется плато, на котором частота меняется слабо при высокой добротности внешнего контура [67]. При неоптимальной фазе запаздывания отраженной волны (или отсутствии запаздывания в схеме с генератором Ван-дер-Поля) состояния равновесия на этом плато неустойчивы, при оптимальной

28. S.M.Lewis, J.Merrick, M.A.K.Othman, A.Haase, S.Tantawi, E.A.Nanni. Design, fabrication, and tuning of a THz-driven electron gun // *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2022. V. 25, 121301. doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.25.121301
29. С.Н.Власов, И.М.Орлова. Квазиоптический преобразователь волн волновода круглого сечения в узконаправленный волновой пучок // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1974. Т. 17, № 1. С. 148-154
30. M.I.Petelin. The first decade of the gyrotronics // *J Infrared Milli Terahz Waves*. 2017. V. 38, no. 11. P. 1387-1396. doi: 10.1007/s10762-017-0423-9
31. O.Dumbrajs. Influence of possible reflections on the operation of European ITER gyrotrons // *Int. J. Infrared, Milli. Terahz. Waves*. 2010. V. 31. P. 892. doi: 10.1007/s10762-010-9653-9
32. T.Saito, M.M.Melnikova, N.M.Ryskin, S.Tanaka, R.Shinbayashi, Y.Yamaguchi, ... Y.Tatematsu. Effect of Reflection on Mode Competition and Multi-Frequency Oscillation in a High-Power Sub-THz Gyrotron: Experimental Observation and Theoretical Analysis. *J Infrared Milli Terahz Waves*. 2020. V. 1, no. 6. P.697-710. doi:10.1007/s10762-020-00695-1
33. A.V. Chirkov, G.G. Denisov, A.N. Kuftin. Perspective gyrotron with mode converter for co- and counter-rotation operating modes // *Appl. Phys. Lett*. 2015. V. 106, no. 26. doi: 10.1063/1.4923269
34. И.В.Зотова, Н.С.Гинзбург, Г.Г.Денисов, Р.М.Розенталь, А.С.Сергеев. Режимы захвата и стабилизации частоты генерации в мощных гиротронах с низкочастотными резонаторами // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2015. Т. 58, № 9. С. 759-769.
35. P.Brücker, K.A.Avramidis, A.Marek, M.Thumm and J.Jelonck. Theoretical investigation on injection locking of the EU 170 GHz 2 MW TE34,19-mode coaxial-cavity gyrotron // 46th Int. Conf. Infrared, Milli and Terahz Waves (IRMMW-THz), Chengdu, China. 2021. P. 1-2. doi: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567563.
36. М.Ю.Глявин, Г.Г.Денисов, И.В.Железнов, И.В.Зотова, А.М.Малкин, А.С.Сергеев. Гироумножители на пятой циклотронной гармонике на основе мощных гиротронов для плазменных приложений // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2023. Т. 66, №7-8. С. 527-537.
37. G.G.Denisov, I.V.Zotova, I.V.Zheleznov, A.M.Malkin, N.S.Ginzburg, A.S.Sergeev, E.S.Semenov, M.Yu.Glyavin. Phase-locking of second-harmonic gyrotrons for providing MW-level output power // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2022. V. 69, no. 2. P. 754-758. doi: 10.1109/TED.2021.3134187
38. A.N.Kuftin, G.G.Denisov, A.V.Chirkov, M.Yu.Shmelev, V.I.Belousov, A.A.Ananichev, B.Z.Movshevich, I.V.Zotova, M.Yu.Glyavin. First demonstration of frequency-locked operation of a 170 GHz/ 1 MW gyrotron // *IEEE Electron Devices Lett*. 2023. V. 44, no. 9. P. 1563-1566. doi: 10.1109/LED.2023.3294755
39. Н.В.Григорьева, Н.М.Рыскин. Исследование синхронизации гиротрона в режиме жёсткого возбуждения на основе модифицированной квазилинейной модели // *Изв. вузов, Радиофизика*. 2022. Т. 65, № 5/6. С. 406-419.
40. А.А.Богданов, М.Ю.Глявин, Р.М.Розенталь, А.П.Фокин, В.П.Тараканов. Уменьшение ширины спектра излучения гиротрона при использовании внешних отражений // *Письма в ЖТФ*. 2018. Т.44, №5. С. 87-94. doi: 10.21883/PJTF.2018.05.45712.17032_
41. M.Yu.Glyavin, I.V.Zotova, A.P.Fokin, T.Idehara, et.al. Frequency stabilization in a sub-terahertz gyrotron with delayed reflections of output radiation // *IEEE Trans. Plasma Sci*. 2018. V. 46, no. 7. P. 2465-2469. doi: 10.1109/TPS.2018.2797480

14. K.Sakamoto, A.Kasugai, K.Takahashi, R.Minami, N.Kobayashi, K.Kajiwara. Achievement of robust high-efficiency 1 MW oscillation in the hard-self-excitation region by a 170 GHz continuous-wave gyrotron // Nat. Phys. 2007. V. 3. P. 411–414. doi:10.1038/nphys599
15. X.Chen, G.S.Nusinovich, O.Dumbrajs, H.Xiao, X.Han, D.Xia, T.Peng. Mode excitation in gyrotrons with triode-type electron guns // IEEE Trans. Electron Devices. 2022. V. 69, no. 2. P. 785–793. doi: 10.1109/TED.2021.3137760
16. F.J.Scott, E.P.Saliba, B.J.Albert, N.Alaniva, E.L.Sesti, C.Gao, A.B.Barnes, et.al. Frequency-agile gyrotron for electron decoupling and pulsed dynamic nuclear polarization // J Magn Reson. 2018. V. 289. P. 45–54. doi:10.1016/j.jmr.2018.02.010
17. E.M.Khutoryan, T.Idehara, A.N.Kuleshov, Y.Tatematsu, Y.Yamaguchi, Y.Matsuki, T.Fujiwara. Stabilization of gyrotron frequency by PID feedback control on the acceleration voltage // J Infrared Milli Terahz Waves. 2015. V. 36, no.12. P. 1157–1163. doi:10.1007/s10762-015-0212-2
18. S.Pan, C.-H.Du, Z.-C.Gao, H.-Q.Bian, P.-K.Liu. Electronic-tuning frequency stabilization of a terahertz gyrotron oscillator // IEEE Trans. Electron Devices. 2018. V. 65, no. 8. P. 3466–3473. doi:10.1109/ted.2018.2839907
19. L.Krier, K.A.Avrמידis, H.Braune, et.al., W7-X Team. Short-pulse frequency stabilization of a MW-class ECRH gyrotron at W7-X for CTS diagnostic // Fusion Eng. Des. 2023. V. 192. doi: 10.1016/j.fusengdes.2023.113828
20. E.V.Suvorov, E.Holzhauser, W.Kasperek, L.V.Lubyako, A.B.Burov, ... Y.A.Dryagin. Collective Thomson scattering at W7-AS // Plasma Phys. Control. Fusion. 1997. V. 39, no. 12B, P. B337–B351. doi:10.1088/0741-3335/39/12b/026
21. A.G.Shalashov, E.D.Gospodchikov, T.Khusainov, et.al. Collective Thomson scattering diagnostic for the GDT open magnetic trap // Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. doi:10.1088/1361-6587/ab83cc
22. H.P.Laqua, D.Moseev, P.Helander, P.Aleynikov, S.Marsen, N.B.Maruschenko, T.Stange. Generation of electrostatic oscillations in the ion cyclotron frequency range by modulated ECRH // Nucl. Fusion. 2018. V. 58, no. 10. 104003. doi:10.1088/1741-4326/aad754
23. N.N.Skvortsova, D.K.Akulina, G.M.Batanov, N.K.Kharchev, L.V.Kolik, L.M.Kovrizhnykh, G.S.Voronov. Effect of ECRH regime on characteristics of short-wave turbulence in plasma of the L-2M stellarator // Plasma Phys. Control. Fusion. 2010. V.52, no 5. 055008. doi:10.1088/0741-3335/52/5/055008
24. D.Grasso, D.Borgogno, L.Comisso, E.Lazzaro. Magnetic island suppression by electron cyclotron current drive as converse of a forced reconnection problem // J. Plasma Phys. 2018. V. 84, no. 3. doi:10.1017/s0022377818000569
25. D.Murakami, K.Parkin. An Overview of the NASA ames millimeter-wave thermal launch system. // Procs. 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propuls. Conf. Exhibit. 2012. P. 1–10. doi:10.2514/6.2012-3741
26. K.Komurasaki, K.Tabata. Development of a novel launch system microwave rocket powered by millimeter-wave discharge // Int. J. Aerosp.x Eng. 2018. V. 2018. P. 1–9. doi:10.1155/2018/9247429
27. J.F.Picard, S.C.Schaub, G.Rosenzweig, J.C.Stephens, M.A.Shapiro, R.J.Temkin. Laser-driven semiconductor switch for generating nanosecond pulses from a megawatt gyrotron // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 114, no. 16. Art. 164102. doi: 10.1063/1.5093639

фазе – устойчивы, то есть частота стабилизируется. Этот эффект был исследован для генератора Ван-дер-Поля и для гиротрона в работах [4*,12*,20*,21*,31*,32*,42*,43*].

Методология и методы исследования

В диссертационной работе рассмотрен гиротрон, в резонатор которого из сопряженного выходного волноводного тракта поступает внешняя или отраженная волна. Описание режимов работы такого гиротрона основано на решении усредненных по высокой частоте уравнений возбуждения полей и уравнений движения электронов. Уравнения возбуждения получены методом возмущений в приближении малого влияния электронного пучка, внешней волны, дифракционных и омических потерь на продольную структуру поля в резонаторе гиротрона. Дифракционные потери и воздействие внешнего сигнала рассматриваются как возмущения, аналогично рассмотрению омических потерь в закрытом резонаторе при сильном скин-эффекте [68]. Такой подход, предложенный ранее для стационарной задачи М.И.Петелиным [44*], развит для описания нестационарных процессов в работах [2*,4*,36*]. Приближение фиксированной продольной структуры поля справедливо для гиротронов с высокочастотными резонаторами, в которых добротность моды с номером Q_s существенно выше минимальной дифракционной добротности: $Q_s \gg Q_{min}$, где $Q_{min} = 4\pi(l/\lambda_s)^2$ – минимальная дифракционная добротность, λ_s – длина волны в вакууме, l – длина однородного участка резонатора [69]. Как показало сопоставление численных расчетов, проведенных на основе уравнений с фиксированной продольной структурой поля и более точных уравнений с нефиксированной структурой, это приближение достаточно хорошо описывает реальный гиротрон. Преимуществом приближения фиксированной продольной структуры поля по сравнению с более точным подходом является переход к уравнениям в полных производных, что позволяет значительно упростить и ускорить численное моделирование, получить ряд результатов аналитически и объяснить основные закономерности рассматриваемых эффектов.

При исследовании гиротрона с нерезонансным отражателем было показано, что в линии запаздывания устанавливается определенное продольное распределение поля (продольная мода длинной линии), и при изменении параметров системы происходят переходы между продольными модами длинной линии. При этом предполагалось, что внутри резонатора продольная структура с одной вариацией поля остается неизменной [4*,20*-24*,33*-35*].

Задача о воздействии отражения от внешнего высокочастотного резонатора рассматривалась двумя способами – на основе уравнений гиротрона с сильной частотной зависимостью коэффициента отражения от резонансной нагрузки [4*,20*,21*] и на основе уравнений связанных колебаний гиротрона и внешнего резонатора [31*,32*,42*,43*]. Последний подход, аналогичный

используемому в классической теории колебаний [67,70], позволил исследовать процесс установления колебаний не только в гиротроне, но и во внешнем резонаторе.

Следует отметить связь исследованных в диссертации задач с фундаментальными задачами теории колебаний – задачей о синхронизации генератора внешним монохроматическим сигналом и о влиянии запаздывающей обратной связи, частным случаем которой является отраженная волна. Если в приближении фиксированной продольной структуры поля ограничиться рассмотрением единственной рабочей моды и предполагать, что восприимчивость, вносимая электронным пучком в резонатор гиротрона, квадратично зависит от амплитуды поля (что справедливо при малых полях), а также пренебречь реактивностью восприимчивости (то есть сдвигом частоты генерации относительно собственной «холодной» частоты резонатора гиротрона), то уравнения гиротрона переходят в классические уравнения генератора Ван-дер-Поля с внешним сигналом или запаздывающим отражением [67,70,71,25*,33*-36*].

Однако нелинейная динамика гиротрона по сравнению с одномодовыми генераторами является более сложной из-за конкуренции мод. В гиротроне выход из режима захвата сопровождается в некоторых областях параметров не только биениями частоты и амплитуды рабочей моды, как в классической задаче, но и возбуждением паразитных мод. В частности, вне зон захвата может происходить параметрический распад рабочей моды на две соседние моды с одинаковыми радиальными индексами, симметрично отстоящие по частоте (аналог четырехфотонного распада в оптике) [1*-6*,14*-19*]¹. Воздействие внешнего сигнала приводит к тому, что четырехфотонный распад происходит при существенно меньших токах, чем в свободном гиротроне [1*-4*]. Это объясняется возрастанием поля рабочей моды при воздействии внешнего сигнала, что аналогично увеличению тока в автономном режиме, в результате чего сильная рабочая мода распадается на два боковых сателлита. Другим отличием от классической теории колебаний является асимметрия амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) при захвате частоты гиротрона [46,15*-17*,42*,43*], тогда как для генератора Ван-дер-Поля АЧХ симметричны. Асимметрия АЧХ в гиротроне возникает из-за сдвига частоты генерации гиротрона относительно собственной частоты его резонатора.

Для объяснения причин, приводящих к стабилизации частоты отраженной волной, представляется целесообразным провести аналогию между процессами захвата частоты генератора, в частности, гиротрона, внешним сигналом и стабилизацией частоты отраженной волной. Внешний монохроматиче-

¹ В круглом волноводе моды высокого порядка, у которых радиальные индексы одинаковы, а азимутальные индексы отличаются на единицу друг от друга, образуют почти эквидистантный спектр по частоте.

44*. Н.Ф.Ковалев, Ю.В.Новожилова, М.И.Петелин. Диффузионная связь бочкообразного резонатора с соосным волноводом // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10-11. С. 885-884.

Список цитированной литературы

1. A.G. Litvak, G. G. Denisov, M. Y. Glyavin. Russian gyrotrons: achievements and trends //IEEE Journal of Microwaves. 2020. V. 1, no. 1. P. 260–268. doi: 10.1109/JMW.2020.3030917
2. G.S.Nusinovich, M.K.A.Thumm, M.I.Petelin. The Gyrotron at 50: Historical Overview. // J Infrared Milli Terahz Waves. 2014. V. 35, no. 4. P. 325–381. doi: 10.1007/s10762-014-0050-7
3. M.K.A.Thumm, G.G.Denisov, K.Sakamoto, M.Q.Tran High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nucl. Fusion. 2019. V. 59, no. 7. P. 073001. doi: 10.1088/1741-4326/ab2005
4. G.G. Denisov. New trends in gyrotron development // EPJ Web of Conf. 2017. V. 149, 01001. 10th Int. Work. “Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications” doi: 10.1051/epjconf/201714901001
5. P.C.Kalaria, K.A.Avrמידis, J.Franck, G.Gantenbein, S.Illy, J.Jin, I.G.Pagonakis, M.Thumm, J.Jelonnek. RF Behavior and launcher design for a fast frequency step-tunable 236 GHz gyrotron for DEMO // Frequenz. 2017. V. 71, no. 3-4. P. 161-171. doi: 10.1515/freq-2016-0212
6. K.Avrמידis, G.Aiello, S.Alberti, P.T.Brücker, A.Bruschi, I.Chelis, ... M.Q.Tran. Overview of recent gyrotron R&D towards DEMO within EUROfusion Work Package Heating and Current Drive // Nucl. Fusion. 2019. V. 59, no. 6. Art. 066014. doi:10.1088/1741-4326/ab12f9
7. G.S. Nusinovich. Mode interaction in gyrotrons. // Int. J. Electron. 1981. V. 51, no. 4. P. 457-474.
8. S. P. Sabchevski, M. Yu. Glyavin, G. S. Nusinovich. The progress in the studies of mode interaction in gyrotrons // J Infrared Milli Terahz Waves. 2022. V. 43, no. 1. P. 1-47. doi: 10.1007/s10762-022-00845-7
9. M.Glyavin, V.Zapevalov, T.Idehara, et al. Influence of voltage fluctuations on gyrotron efficiency and stability // J Infrared Milli Terahz Waves. 2003. V. 24, no. 4. P. 409–418. doi: 10.1023/A:1022403627410
10. A.Fokin, M.Glyavin, G.Golubiatnikov, M.Morozkin, B.Movshevich, A.Tsvetkov, G.Denisov. High-power sub-terahertz source with a record frequency stability at up to 1 Hz // Sci. Rep. 2018. V. 8, no. 1. P.1-5. doi: 10.1038/s41598-018-22772-1
11. A.Schlaich, G.Gantenbein, S.Illy, J.Jelonnek, M.Thumm. Observation of discrete frequency hopping in MW-class gyrotrons during long-pulse operation // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. V. 62, no. 9. P. 3049-3055. doi:10.1109/TED.2015.2455023
12. J.Franck, K.Avrמידis, G.Gantenbein, S.Illy, J.Jin, M.Thumm, J.Jelonnek. A generic mode selection strategy for high-order mode gyrotrons operating at multiple frequencies // Nucl. Fusion. 2015. V. 55, no. 1. doi: 10.1088/0029-5515/55/1/013005
13. G.S.Nusinovich, A.N.Vlasov, T.M.Antonsen, J.Lohr, B.G. Danly, J.-P.Hogge. Excitation of parasitic modes in gyrotrons with fast voltage rise // Phys. Plasmas. 2008. V. 15, no. 10. doi: 10.1063/1.2988336

31*. Ю.В.Новожилова, А.А.Богдашов, М.Ю.Глявин, Г.Г.Денисов, А.П.Фокин, А.В.Назаровский, Р.М.Розенталь. Исследование возможности стабилизации частоты двух гиротронов при воздействии отражения от внешнего высокочастотного резонатора // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 11. doi: 10.30898/1684-1719.2023.11.23

32*. Ю.В. Новожилова, А.А. Богдашов, А.В. Назаровский, А.П. Фокин, М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов. Моделирование режимов генерации двух гиротронов с общим резонансным отражателем // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 11. doi: 10.30898/1684-1719.2023.11.22

33*. Ю.В. Новожилова, Н.М. Рыскин, С.А. Усачева. Нестационарные процессы в генераторе с запаздывающим отражением от нагрузки // Журнал технической физики. 2011. Т. 81, № 9. С. 16-22.

34*. Ю.В.Новожилова. Параметрическая неустойчивость в генераторе с запаздывающим отражением от нагрузки. I. Теория // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 2. С. 112-127.

35*. Ю.В.Новожилова, А.С.Сергеев, С.А.Усачева. Параметрическая неустойчивость в генераторе с запаздывающим отражением от нагрузки. II. Численное исследование // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 2. С. 128-140.

36*. Ю. В. Новожилова, Н. М. Рыскин, М. М. Чумакова. Влияние отражения от удаленной нагрузки на конкуренцию мод в гиротроне с квазиоптическим выходным преобразователем // Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 6. С. 136-147

37*. А.Фернандез, Н.К.Харчев, Ю.В.Новожилова, Г.М.Батанов, Ю.Ф.Бондарь, Л.В.Колик, К.А.Сарксян, А.Толкачев. Реакция гиротрона на малое отражение от нестационарной нагрузки // Прикладная физика. 2009. № 6. С.158-165.

38*. Г. М. Батанов, Л. В. Колик, Е. М. Кончечков, Д. В. Малахов, Ю. В. Новожилова, М. И. Петелин, А. Е. Петров, А. А. Пшеничников, К. А. Сарксян, Н. Н. Скворцова, Н. К. Харчев. Спектры низкочастотной модуляции излучения гиротрона при электронно-циклотронном нагреве плазмы в стеллараторе Л_2М. // Физика плазмы. 2011. Т. 37, № 5. С. 414-424.

39*. Н.К.Харчев, М.И.Петелин, А.Каппа, Е.М.Кончечков, Г.М.Батанов, В.Д.Борзосеков, Л.В.Колик, Д.В.Малахов, Х.Мартинез, Ю.В.Новожилова, А.Е.Петров, К.А.Сарксян, Н.Н.Скворцова, В.Д.Степахин, А.В.Толкачев. Взаимодействие гиротрона со слабоотражающей нагрузкой // Проблемы СВЧ электроники. 2013. Т. 1, № 1. С. 122.

40*. A.V. Palitsin, Yu.V. Rodin, A.G. Luchinin, A.N. Panin, V.L. Bakunin, Yu.V. Novozhilova, A.V. Gromov, M.B. Goykhman, A.S. Zuev, M.Yu. Glyavin. Experimental study of multi-mode dynamics of THz-band pulsed magnetic field gyrotron // IEEE Electron Device Letters. 2020. V. 41, no. 10. P. 1576-1579. doi: 10.1109/LED.2020.3018551

41*. В.Л. Бакунин М.Ю. Глявин Ю.В. Новожилова А.С. Седов 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. doi: 10.18127/j15604128-201806-06

42*. А.С.Ищенко, Ю.В.Новожилова, М.И.Петелин. Теория захвата генератора Ван-дер-Поля запаздывающим отражением от резонансной нагрузки // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. № 6. С. 537-551.

43*. Yu. V. Novozhilova, A.S. Ishenko. Analytical theory of an RF generator phase-locked by the resonant load with delayed reflection // J Infrared Millim Terahertz Waves. 2011. V.32, no. 12. P. 1394-1406. doi: 10.1007/s10762-011-9828-z

ский сигнал захватывает частоту генератора, если разность их частот (внешнего сигнала и свободных колебаний генератора) лежит в некоторой полосе захвата, ширина которой для сигналов малой (по сравнению с излученной волной) амплитуды пропорциональна отношению амплитуды поля внешнего сигнала к амплитуде свободных колебаний в генераторе [46,67,70,71,1*-6*,8*,9*,15*-17*,43*]. Если внешний сигнал не монохроматический, но ширина полосы его частот мала по сравнению с шириной полосы захвата, то такой квазимонохроматический сигнал также может захватить частоту генератора [15*-17*]. При этом частота генератора в каждый момент времени совпадает с мгновенной частотой внешнего сигнала. Можно ввести некоторую «эффективную» полосу захвата отраженной волной, амплитуда которой равна амплитуде внешнего сигнала. Очевидно, что ширина этой полосы пропорциональна коэффициенту отражения. Если частота отраженной волны, изменяясь при изменении параметров системы, остается в узкой полосе (ширина которой мала по сравнению с шириной «эффективной» полосы захвата), то частота колебаний генератора будет оставаться в той же узкой полосе, т.е. стабилизироваться. Это означает, что нерезонансную отражающую нагрузку следует поместить на достаточно большое расстояние, такое, чтобы расстояние между продольными модами линии запаздывания $1/\tau$ (τ – время запаздывания) было много меньше ширины «эффективной» полосы захвата [4*,20*-26*]. Для стабилизации частоты гиротрона отражением от внешнего резонатора добротность внешнего резонатора должна быть настолько велика, чтобы полоса изменения его собственных частот была много уже ширины «эффективной» полосы захвата [31*,32*,42*,43*]. Эти качественные рассуждения об аналогии воздействия внешнего и отраженного сигнала подтверждаются аналитическими результатами и численными расчетами. В частности, декремент затухания возмущений фазы стабилизированных по частоте состояний при воздействии отраженной волны, как и при захвате внешних сигналом, пропорционален коэффициенту отражения, то есть амплитуде приходящей извне волны.

Однако существуют и различия процесса стабилизации частоты при воздействии внешнего и отраженного сигнала на гиротрон. При захвате внешним заданным сигналом частота излучения равна частоте внешнего сигнала, и устанавливается определенная фаза излучения, зависящая от параметров гиротрона и внешнего сигнала [5*]. При воздействии отраженной волны ее частота и фаза вырабатываются в процессе взаимодействия с гиротроном и зависят от параметров гиротрона [26*].

Цели и задачи диссертационной работы

Основными целями диссертационной работы являются:

1. Исследование преимуществ захвата частоты гиротрона монохроматическим сигналом: возможности продвижения в область оптимальных параметров, увеличения мощности и рабочих токов, расширения полосы перестройки

частоты излучения, уменьшения фазовых флуктуаций при вариациях напряжения. Нахождение границ зон захвата и картины конкуренции мод вне зон захвата.

2. Сопоставление полученных теоретических результатов с данными экспериментов по захвату частоты мощных гиротронов на рабочих частотах 35 ГГц и 170 ГГц.

3. Исследование возможности захвата частоты гиротрона при воздействии сигнала с гармонической и ступенчатой модуляцией частоты или амплитуды, а также двух монохроматических сигналов с близкими частотами.

4. Исследование возможности стабилизации частоты гиротрона волной, отраженной от удаленной нерезонансной нагрузки.

5. Исследование возможности стабилизации частоты гиротрона при отражении части излучения от внешнего высокочастотного резонатора.

6. Определение параметров гиротрона и отражателя для экспериментального исследования стабилизации частоты 28 ГГц гиротрона с прямым вводом излучения при отражении части излучения от удаленной нерезонансной нагрузки в виде диафрагмы выходного волновода и от внешнего квазиоптического резонатора.

Научная новизна диссертации

В результате выполнения работы

– метод последовательных приближений использован для получения уравнения возбуждения поля на квазикритической частоте в резонаторе с дифракционным выводом излучения и поступающим извне внешним сигналом или отраженной волной;

– в мощном гиротроне с модами высокого порядка теоретически показана возможность подавления паразитных мод внешним монохроматическим сигналом и получения одномодовой генерации в оптимальной по КПД и мощности области параметров; увеличения мощности вплоть до мегаваттного уровня даже в субмиллиметровом диапазоне; существенного расширения полосы генерации на рабочей моде;

– теоретические результаты подтверждены данными экспериментов по захвату частоты мощных 35 ГГц и 170 ГГц гиротронов внешним монохроматическим сигналом: показано увеличение мощности на 11% и расширение полосы генерации в два раза в 170 ГГц гиротроне; найдены границы зон захвата и одномодовой генерации рабочей и соседних мод, исследованы режимы, возникающие за пределами зон захвата;

– теоретически показана возможность управления частотой мощного гиротрона при воздействии квазимонохроматического сигнала с амплитудной и частотной модуляцией и двух монохроматических сигналов. Проведено сравнение режимов гиротрона при гармонической и ступенчатой модуляции параметров внешнего сигнала;

пульса ускоряющего напряжения в гиротроне при воздействии внешнего сигнала // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т.63, № 5-6. С. 422-433.

19*. V.L.Bakunin, G.G.Denisov, M.Yu.Glyavin, Yu.V.Novozhilova. Effect of non-ideal electron beam characteristics on the performance of a megawatt-power gyrotron with an external monochromatic signal // J Infrared Millim Terahertz Waves. 2023. V. 41, no. 9. P. 1131-1143. doi: 10.1007/s10762-023-00930-5

20*. М.Ю.Глявин, Г.Г.Денисов, М.Л.Кульгин, Ю.В.Новожилова. Стабилизация частоты гиротрона отражением от нерезонансной и резонансной нагрузки // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 13. С. 25-32.

21*. М.Ю.Глявин, Г.Г.Денисов, М.Л.Кульгин, М.М.Мельникова, Ю.В.Новожилова, Н.М.Рыскин. Стабилизация частоты гиротрона слабой отраженной волной // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т.58, №9. С.747-758.

22*. Н.М.Рыскин, М.М.Мельникова, А.Г.Рожнёв, А.В.Тышкун, К.А.Якунина, М.Ю.Глявин, Ю.В.Новожилова. Исследование управления спектром генерации гиротрона путем захвата внешним сигналом и сигналом, отраженным от удаленной нагрузки // Проблемы СВЧ электроники. 2015. Т. 2, № 1. С. 68-71.

23*. М.М.Melnikova, A.G.Rozhnev, N.M.Ryskin, A.V.Tyshkun, M.Yu.Glyavin, Yu.V.Novozhilova. Frequency stabilization of a 0.67-THz gyrotron by self-injection locking // IEEE Trans. On Electron Devices. 2016. V. 63, no. 3. P. 1288-1293. doi: 10.1109/TED.2015.2512868

24*. А.П.Фокин, М.Ю.Глявин, Г.Г.Денисов, А.И.Цветков, А.А.Богдашов, М.В.Морозкин, Ю.В.Новожилова, Б.З.Мовшевич, А.Г.Лучинин. Управление мощностью и частотой излучения гиротронов, предназначенных для микроволновой обработки материалов, спектроскопии и диагностики различных сред // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 1, № 1. С. 129-131.

25*. М.М.Chumakova, S.A.Usacheva, M.Yu.Glyavin, Yu.V.Novozhilova, N.M.Ryskin. Mode competition in a two-mode gyrotron with delayed reflections // IEEE Trans. On Plasma Sci. 2014. V. 42, no. 8. P. 2030-2036. doi: 10.1109/TPS.2014.2331235

26*. В.Л.Бакунин, Г.Г.Денисов, А.Н.Куфтин, Ю.В.Новожилова, А.П.Фокин, А.С.Зуев, Е.С.Семенов. Стабилизация частоты излучения гиротрона с удалённым отражателем в условиях взаимодействия мод эквидистантного спектра // Известия вузов. Радиофизика. 2022. Т.65, №8. С. 621-633.

27*. Y.M.Guznov, Y.Y.Danilov, S.V.Kuzikov, Y.V.Novozhilova, A.S.Shevchenko, N.I.Zaitsev, N.M.Ryskin. Megawatt-power Ka-band gyrokystron oscillator with external feedback // Appl. Phys. Lett. 2013. V.103. doi: 10.1063/1.4826453

28*. S.A.Usacheva, M.M.Chumakova, M.YU. Glyavin, Yu .V. Novozhilova and N. M. Ryskin. Effect of reflection from the remote load on mode competition in multimode resonant electron oscillators // Applied Radio Electronics (Kharkiv). 2013. V. 12, no. 1. P. 54-57.

29*. С.А.Усачева, М.М.Чумакова, Е.Н.Перегородова, Н.М.Рыскин, М.Ю.Глявин, Ю.В.Новожилова. Исследование процессов синхронизации и конкуренции мод в многомодовых электронных лазерах // Проблемы СВЧ электроники. 2013. Т. 1, № 1. С. 117-121.

30*. E.N.Starodubova, S.A.Usacheva, N.M.Ryskin, Y.V.Novozhilova, G.S.Nusinovich. Injection locking of a two-mode electron oscillator with close frequencies // Phys. Plasmas. 2015. V. 22, no. 3. Art. 033108. doi:10.1063/1.4914155

6*. V.L.Bakunin, G.G.Denisov, Yu.V.Novozhilova. Principal enhancement of THz-range gyrotron parameters using injection locking // IEEE Electron Device Letters. 2020. V. 41, no. 5. P. 777-780. doi: 10.1109/LED.2020.2980218.

7*. G.G.Denisov, A.N.Kuftin, V.N.Manuilov, N.A.Zavolsky, A.V.Chirkov, E.A.Soluyanov, E.M.Tai, M.I.Bakulin, A.I.Tsvetkov, A.P.Fokin, Yu.V.Novozhilova, B.Z.Movshevich, M.Yu.Glyavin. Design of master oscillator for frequency locking of a complex of megawatt level microwave sources // Microwave and Optical Technology Letters. 2020. V. 62, no.6. P. 2137-2143. doi:10.1002/mop.32330

8*. В.Л.Бакунин, Ю.М.Гузнов, Г.Г.Денисов, Н.И.Зайцев, С.А.Запечалов, А.Н.Куфтин, Ю.В.Новожилова, А.П.Фокин, А.В.Чирков, А.С.Шевченко. Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 11. С. 38-45.

9*. В.Л.Бакунин, Ю.М.Гузнов, Г.Г.Денисов, Н.И.Зайцев, С.А.Запечалов, А.Н.Куфтин, Ю.В.Новожилова, А.П.Фокин, А.В.Чирков, А.С.Шевченко. Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 7-8. С. 539-548.

10*. А.А.Богдашов, М.Ю.Глявин, Ю.В.Новожилова, А.С.Седов, А.П.Фокин. Экспериментальное исследование влияния отражений от нерезонансной нагрузки на режимы генерации гиротрона // Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. Т.24, №2. С. 42-49.

11*. А.А.Богдашов, А.П.Фокин, М.Ю.Глявин, Ю.В.Новожилова, А.С.Седов. Experimental study of the influence of reflections from a non-resonant load on the gyrotron operation regime // J of Infrared, Millim and Terahertz Waves. 2020. V. 41, no. 2. P. 164-170. doi:10.1007/s10762-019-00655-4

12*. А.П.Фокин, А.А.Богдашов, Ю.В.Новожилова, V.L.Bakunin, V.V.Parshin, M.Yu.Glyavin. Experimental demonstration of gyrotron frequency stabilization by resonant reflection // IEEE Electr Device Lett. 2021. V. 42, no. 7. P. 1077-1080. doi: 10.1109/LED.2021.3083641

13*. А.А.Богдашов, Ю.В.Новожилова, А.П.Фокин, М.Ю.Глявин. Резонансные отражатели для экспериментального исследования влияния отраженного сигнала на режимы работы гиротронов // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 5-6. С. 411-421.

14*. V.L.Bakunin, M.Yu.Glyavin, G.G.Denisov, Yu.V.Novozhilova. Investigation of mode interaction for a gyrotron with dense mode spectrum // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2020. doi:10.1080/09205071.2020.1821790.

15*. В.Л.Бакунин, Г.Г.Денисов, Ю.В.Новожилова. Захват частоты многомодового гиротрона квазимонохроматическим внешним сигналом // Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, №7-8. С. 549-565.

16*. В.Л.Бакунин, Г.Г.Денисов, Ю.В.Новожилова. Нелинейная динамика многомодового гиротрона под воздействием внешнего квазимонохроматического сигнала. Журнал радиоэлектроники (электронный журнал) 2019. № 12. doi: 10.30898/1684-1719.2019.12.1

17*. V.L.Bakunin, G.G.Denisov, Y.V.Novozhilova. Influence of an external signal with harmonic or stepwise-modulated parameters on the high-power gyrotron operation // J Infrared Millim Terahz Waves. 2021. V. 42, no. 2. P. 117-129. doi:10.1007/s10762-020-00758-3

18*. М.Ю.Глявин, М.В.Морозкин, Н.М.Рыскин, Н.В.Григорьева, В.Л.Бакунин, Ю.В.Новожилова. Динамика многомодовых процессов на фронте им-

– найдены условия, при которых возможна стабилизация частоты излучения гиротрона волной, отраженной от удаленной нерезонансной нагрузки. Показано, что для эффективной стабилизации частоты необходимо существование нескольких состояний равновесия гиротрона с удаленным отражателем, что осуществляется при достаточно большом запаздывании. Проанализирована устойчивость состояний равновесия относительно роста возмущений амплитуды и относительно параметрического распада исходного состояния на два боковых симметрично отстоящих по частоте сателлита. Показано, что существуют устойчивые стабилизированные по частоте состояния;

– показано, что при оптимальной фазе запаздывания воздействие отражения от внешнего резонатора стабилизирует частоту, при этом стабилизированное состояние устойчиво. Найден сценарий возвращения в это состояние при малых возмущениях;

– теоретические результаты подтверждены данными экспериментов по стабилизации частоты гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц отражением от нерезонансной и резонансной нагрузки;

– показана аналогия явлений захвата частоты внешним сигналом и стабилизации частоты отраженной волной.

Теоретическая и практическая значимость работы

Все результаты диссертации имеют высокую теоретическую и практическую значимость. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что захват частоты мощного гиротрона внешним монохроматическим сигналом, помимо стабилизации частоты, дает возможность продвижения гиротрона в субмиллиметровый диапазон при сохранении высокого (мегаваттного) уровня мощности и позволяет в несколько раз увеличить диапазон перестройки частоты в режиме захвата. Теоретические и экспериментальные исследования стабилизации частоты отраженной волной представляют большой практический интерес для таких приложений, как плазменная диагностика, коллективное томсоновское рассеяние и подавление плазменных неустойчивостей. Показано, что интервал изменения частоты излучения, вызванного вариациями ведущего магнитного поля, напряжения или собственной частоты резонатора гиротрона, может быть уменьшен в несколько раз при использовании внешнего высокооборотного отражателя или удаленного нерезонансного отражателя. Теоретическое исследование возможности управления режимами генерации (частотой и амплитудой) мощного гиротрона при воздействии внешнего сигнала с промодулированными частотой или амплитудой является актуальным для задач подавления магнитогидродинамических неустойчивостей плазмы и диагностики плазмы. Также это исследование позволяет определить требуемые параметры гиротрона-драйвера.

Достоверность полученных результатов

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Подтверждением этого служит хорошее качественное и количественное совпадение теоретических и экспериментальных результатов. В исследованиях применялись надежные и хорошо апробированные методы теоретического анализа, математического моделирования и численных расчетов, а также сравнение результатов, полученных аналитически и численно. Физическая интерпретация полученных результатов согласуется с существующими представлениями и литературными данными. Положения и результаты диссертации опубликованы в 44 научных статьях в журналах [1*-44*], из них 4 статьи в журналах первого квартиля, 9 статей в журналах второго квартиля по базе Scopus, 11 статей в журнале «Известия ВУЗов. Радиофизика», 3 статьи в журнале «Письма ЖТФ», 3 статьи в журнале «Проблемы СВЧ электроники», 4 статьи в журнале «Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика». Эти работы проходили рецензирование независимыми российскими и международными экспертами.

Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, докладывались автором и обсуждались на семинарах в ИПФ РАН, а также на международных и российских конференциях и школах, включая Всероссийские семинары по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, 2007, 2009, 2019, 2022), Международные зимние школы-семинары по электронике и радиофизике сверхвысоких частот (Саратов, 2009, 2012, лекции), Международную школу «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2010, лекция), Международные научные конференции «СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2003, 2006, 2009, 2010, 2012, 2014, 2015, 2017), Российско-германский семинар по электронно-циклотронному нагреву плазмы и гиротронам (Нижний Новгород, 2014), Международные совещания по сильным микроволнам и терагерцевым волнам: источники и приложения (SMSA, Нижний Новгород, 2005, 2008, 2011, 2014, 2017), Международные конференции по инфракрасным, миллиметровым и терагерцевым волнам (IRMMTW, Карлсруэ, 2004, Париж, 2019, ключевой доклад, Ченду, Китай, 2021), Международную конференцию по вакуумной электронике (IVES, Бейинг, Китай, 2015). Результаты, вошедшие в диссертацию, представлялись как важнейшие результаты ИПФ РАН.

Личный вклад автора

Проблема исследования захвата частоты излучения гиротрона внешним сигналом и стабилизации частоты при отражении была поставлена Г.Г. Денисовым после создания синтезированного двунаправленного квазиоптического преобразователя, позволяющего вводить внешний сигнал в пространство взаимодействия гиротрона в виде рабочей моды и эффективно выводить излуче-

нансной нагрузки. При этом в системе, состоящей из гиротрона, отражателя и линии запаздывания, существует конечное число состояний равновесия (мод, различающихся продольной структурой поля в линии запаздывания). Если число состояний равновесия больше единицы, частота излучения стабилизируется. При увеличении времени запаздывания число состояний равновесия растет, и стабилизация частоты становится более эффективной. Определены условия устойчивости состояний равновесия относительно роста возмущений амплитуды и относительно параметрического распада исходного состояния на симметрично отстоящие по частоте боковые спутники. Показано, что состояния равновесия, устойчивые и неустойчивые относительно амплитудных возмущений, чередуются по частоте. Неустойчивыми относительно параметрического распада могут быть только крайние по частоте состояния равновесия.

7. Теоретически исследована возможность стабилизации частоты излучения гиротрона отражением от внешнего высокочастотного резонатора. Показано, что частота стабилизируется при оптимальной фазе отраженной волны и достаточно большой добротности внешнего резонатора. Стабилизированные по частоте состояния устойчивы относительно роста малых возмущений амплитуды и фазы в гиротроне и внешнем резонаторе.

8. Полученные теоретические результаты легли в основу экспериментов по стабилизации частоты технологического гиротрона с рабочей частотой 28 ГГц при отражении части излучения от удаленной неоднородности выходного волноводного тракта или от внешнего квазиоптического высокочастотного резонатора. Показано, что экспериментальные и теоретические результаты находятся в хорошем соответствии друг с другом.

Список публикаций автора по теме диссертации

- 1*. В.Л.Бакунин, Г.Г.Денисов, Ю.В.Новожилова. Стабилизация частоты и фазы многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности внешним сигналом // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 9. С.41-47.
- 2*. В.Л.Бакунин, Г.Г.Денисов, Ю.В.Новожилова. Зоны захвата частоты многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности внешним сигналом. Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т.58, № 12. С. 999-1011.
- 3*. В.Л.Бакунин, Г.Г.Денисов, Ю.В. Новожилова, А.П.Фокин. Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т.59, № 8-9. С. 709-719.
- 4*. Ю.В.Новожилова, Г.Г.Денисов, М.Ю.Глявин, Н.М.Рыскин, В.Л.Бакунин, А.А.Богдашов, М.М.Мельникова, А.П.Фокин. Стабилизация частоты гиротрона под влиянием внешнего монохроматического сигнала или отраженной от нагрузки волны: Обзор // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т.25, №1. С. 4-34
- 5*. В.Л.Бакунин, Г.Г.Денисов, Ю.В.Новожилова. Фазовый захват внешним монохроматическим сигналом гиротрона с низкочастотными флуктуациями напряжения и тока // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 5-6. С. 434-445.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выведены уравнения возбуждения полей гиротрона, в резонатор которого из сопряженного выходного волновода поступает внешний квазимонохроматический сигнал или отраженная от удаленной нагрузки волна. Уравнения получены методом возмущений в предположении о слабом влиянии электронного пучка, дифракционных и омических потерь, а также внешнего сигнала и отраженной волны на продольную структуру поля в резонаторе гиротрона.
2. Для мощных гиротронов с рабочими модами высокого порядка найдены области параметров, при которых происходит захват частоты и фазы рабочей моды монохроматическим внешним сигналом. Показано, что в результате подавления паразитных мод при фазовом захвате возможно существенное повышение мощности и КПД гиротрона, увеличение в несколько раз ширины полосы перестройки частоты излучения, уменьшение на порядок флуктуаций фазы при низкочастотных вариациях ускоряющего напряжения электронного пучка.
3. Показано, что вне зоны генерации рабочей моды воздействие внешнего сигнала существенно меняет характер взаимодействия мод. В области достаточно высоких токов в автономном гиротроне с частотой 170 ГГц и рабочей модой TE_{28,12} выход из зоны одномодовой генерации происходит в результате возбуждения ближайшей по частоте паразитной низкочастотной моды TE_{-25,13} со встречным вращением полей, тогда как при воздействии внешнего сигнала выход из зоны захвата сопровождается параметрическим 4-фотонным распадом рабочей моды на соседние боковые моды эквидистантного спектра. Токи, при которых возможен параметрический распад под воздействием внешнего сигнала, на 20% ниже, чем в автономном гиротроне.
4. Полученные теоретические результаты были использованы при планировании и проведении экспериментальных исследований захвата частоты гиротронов мегаваттного уровня мощности. Показано, что экспериментальные и теоретические результаты хорошо согласуются.
5. Теоретически исследовано воздействие внешнего сигнала с гармонически и ступенчато меняющимися параметрами на режим генерации многомодового гиротрона. Найдены параметры внешнего сигнала и гиротрона, соответствующие режиму захвата – генерации на мгновенной частоте сигнала с периодически меняющейся амплитудой. Показано, что при достаточно больших значениях глубины и периода модуляции параметров внешнего сигнала режим захвата сменяется биениями рабочей моды или возбуждением паразитных мод.
6. Теоретически показано, что частота излучения гиротрона может быть стабилизирована под воздействием слабого отражения от удаленной нерезо-

ние гиротрона. Это инициировало ряд совместных работ по воздействию внешнего и отраженного сигнала на гиротрон [1*-9*,14*-17*,19*-21*,26*,31*,32*]. Ряд задач о воздействии отраженной волны на режимы работы гиротрона и о подавлении паразитных мод в процессе включения гиротрона был поставлен совместно с М.Ю.Глявиным [10*-14*,18*-24*]. Все выносимые на защиту положения и результаты диссертации получены автором лично. Вклад диссертанта был определяющим в постановке задач, анализе, интерпретации результатов и написании статей в теоретических работах [1*-6*,14*-17*,19*-23*,26*,31*-36*,42*-44*]. Все аналитические результаты, вошедшие в эти работы, получены диссертантом. В экспериментальных работах по захвату внешним сигналом [8*,9*] вклад диссертанта заключался в анализе экспериментальных данных, сопоставлении их с теоретическими результатами и написании статей. В экспериментальных работах по стабилизации частоты отраженной волной [10*-13*] вклад диссертанта состоял в определении основных параметров эксперимента, интерпретации полученных данных и сопоставлении их с результатами теоретического анализа. В экспериментальной работе [27*] об исследовании влияния селективной запаздывающей обратной связи на гиротрон вклад диссертанта заключался в интерпретации полученных данных. Результаты исследований в ходе всей работы обсуждались с Г.Г.Денисовым, М.И.Глявиным, Н.М.Рыскиным, А.П.Фокиным, М.И.Петелиным, А.С.Ищенко, Н.Н.Скворцовой, Г.М.Батановым, К.А.Сарксяном, Н.К.Харчевым. Численное моделирование выполнялось соавторами. Основные численные результаты были получены В.Л.Бакуниным, Н.М.Рыскиным, М.М.Мельниковой, Н.В.Григорьевой, С.А.Усачевой, Е.Н.Стародубовой, М.Л.Кулыгиным, А.В.Назаровским. Теоретический анализ и численное моделирование проводилось для параметров гиротронов, исследованных экспериментально А.Н.Куфтиным, Г.Г.Денисовым, М.Ю.Глявиным, Н.И.Зайцевым, Ю.М.Гузновым, А.П.Фокиным, А.А.Богдашовым, Н.К.Харчевым. Результаты теоретических и экспериментальных работ [7*,18*, 24*,25*,28*-30*,37*-41*] не вошли в выносимые на защиту положения и основные результаты диссертации. В этих работах вклад диссертанта не был основным: диссертант принимал участие в постановке задач, интерпретации полученных результатов и написании статей.

Положения, выносимые на защиту

1. Захват внешним сигналом частоты мощного гиротрона при достаточно высокой плотности спектра взаимодействующих мод существенно меняет характер конкуренции мод, что позволяет подавить паразитные моды, повысить КПД, мощность, увеличить полосу перестройки частоты и получить генерацию в субмиллиметровом диапазоне с мегаваттным уровнем мощности.
2. Фазовый захват и управление частотой мощного гиротрона возможны при воздействии не только монохроматического, но и сигнала с низкоча-

стотной модуляцией частоты и амплитуды, если спектр сигнала лежит внутри полосы захвата частоты гиротрона, а относительная глубина модуляции амплитуды много меньше единицы.

3. Волна, отраженная от удаленной нерезонансной нагрузки или внешнего высокочастотного резонатора, может влиять на гиротрон подобно узкополосному внешнему сигналу и стабилизировать частоту излучения. При этом существует эффективная полоса захвата частоты, совпадающая с полосой захвата внешним сигналом, равным по амплитуде отраженной волне.

4. Для стабилизации частоты излучения гиротрона волной, отраженной от удаленной нерезонансной нагрузки, необходимо, чтобы эффективная полоса захвата частоты была существенно больше расстояния по частоте между продольными модами линии запаздывания. Эти моды могут быть неустойчивы как относительно роста возмущений амплитуды, так и относительно параметрического распада на боковые сателлиты.

5. Для стабилизации частоты при отражении части излучения от внешнего высокочастотного резонатора необходимо, чтобы эффективная полоса захвата частоты была существенно шире полосы частот внешнего резонатора, и фаза отраженной волны была оптимальной.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, двух приложений, заключения, списка литературы и списка публикаций автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 275 страниц, включая 97 рисунков, 5 таблиц, список публикаций автора по теме диссертации из 83 наименований и список литературы из 170 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В **Главе 1** выведено уравнение возбуждения поля рабочей моды гиротрона, в резонатор которого из сопряженного выходного волновода поступает внешний или отраженный сигнал. Предполагается, что поперечная структура поля внешнего или отраженного сигнала совпадает с поперечной структурой поля рабочей моды, частота любой составляющей спектра сигнала близка к собственной частоте резонатора на рабочей моде (см.(5)) [2*,4*,44*]. Динамика амплитуд других мод, попадающих в полосу циклотронного резонанса, и уравнения движения электронов описываются известной самосогласованной системой уравнений многомодового гиротрона [7,72,73]. Использовано приближение фиксированной, не зависящей от времени, продольной структуры поля, справедливое при достаточно высокой добротности резонатора гиротрона, когда полоса частот каждой из мод резонатора гиротрона много уже полосы циклотронного резонанса (то есть время переходных процессов в резонаторе гиротрона много больше времени пролета электронов через пространство взаимодействия) [69]. Найдена связь полей в резонаторе и выход-

том λ_1 , равным прочности предельного цикла свободного автогенератора [70], убывают возмущения амплитуды гиротрона. Затем с меньшим декрементом λ_2 убывают возмущения фазы гиротрона и происходит подтягивание разности фаз гиротрона и отражателя к стационарному значению. На последнем, самом длительном этапе, с наименьшим декрементом λ_3 происходит установление стационарного значения амплитуды колебаний в отражателе.

В **Разделе 5.3** приведены результаты первого экспериментального исследования стабилизации частоты в гиротроне на частоте 28 ГГц с внешним квазиоптическим высокочастотным резонатором, проведенного недавно в ИПФ РАН [12*] А.А.Богдасовым, А.П.Фокиным. Для экспериментальных испытаний использовался гиротрон с прямым вводом-выводом излучения, выходной частотой 28 ГГц, мощностью до 15 кВт, рабочей модой $TE_{0,2}$, добротностью 3400, работающий на второй циклотронной гармонике [92]. Отражение обеспечивал квазиоптический резонатор с двумя сферическими зеркалами. Поскольку гиротрон имеет прямой вывод излучения, после выходного окна были установлены волноводные преобразователи, трансформирующие $TE_{0,2}$ моду резонатора гиротрона в гауссов пучок. Связь гиротрона и внешнего резонатора осуществлялась с помощью пленки полиэтилентерефталата (ПЭТ) толщиной 180 мкм, установленной под углом 45 градусов к направлению распространения волны. Добротность квазиоптического резонатора составила 30000, а коэффициент отражения мощности был равен 10% [13*]. Экспериментальные результаты продемонстрировали эффективную стабилизацию частоты гиротрона при отражении части излучения от высокочастотного резонатора. Производная частоты излучения по ведущему магнитному полю уменьшалась примерно в 10 раз, от 7 ГГц/Т до 0/8 ГГц/Т (**рис.18**). Чувствительность к изменениям ускоряющего напряжения снижалась с 3.5 МГц/кВ до 0.6 МГц/кВ. что было продемонстрировано уменьшением ширины спектра. Полученные экспериментально зависимости частоты от магнитного поля находятся в хорошем соответствии с теоретическими расчетами.

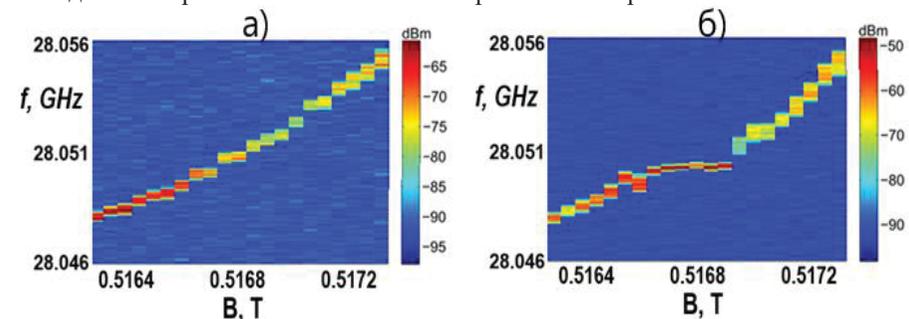


Рис.18. Комбинированные спектры излучения гиротрона для набора значений ведущего магнитного поля в автономном гиротроне (а) и гиротроне с резонансным отражателем (б).

В Разделе 5.1 влияние волны, отраженной от резонансной нагрузки, описывается частотно-зависимым коэффициентом отражения в уравнении возбуждения поля: $R(\xi) = \frac{R_0}{1+i\xi}$, $\xi = \frac{2Q_{ex}(\omega - \omega_{ex})}{\omega_{ex}}$. Такой подход используется

в работах [4*,20*,21*] и в [45], где решены более точные уравнения гиротрона (учитывающие изменение продольной структуры поля в пространстве взаимодействия) с граничным условием, содержащим частотно-зависимый коэффициент отражения. Показана возможность стабилизации частоты излучения при вариациях циклотронной расстройки и собственной частоты резонатора гиротрона. При благоприятной фазе отраженной волны на модуляционных характеристиках (зависимостях частоты излучения от какого-либо параметра гиротрона) образуется пологий стабилизированный участок (плато) (рис.17). Если параметры гиротрона выходят за пределы плато, стабилизация частоты прекращается, имеет место гистерезис, частота меняется скачком. Форма зависимости частоты излучения от холодной частоты определяется фазой запаздывания.

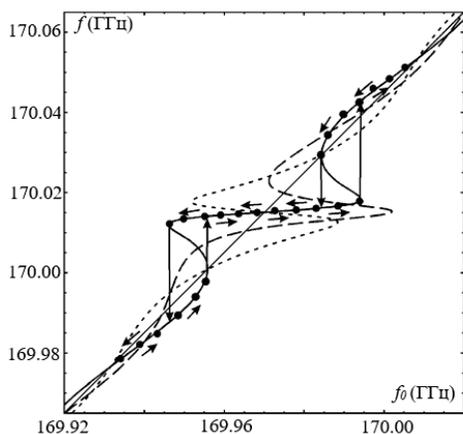


Рис. 17. Аналитическая зависимость частоты излучения гиротрона с резонансным отражателем от холодной частоты, рассчитанная при $R_0 = 0.2$, $Q_{ex} = 25000$. Оптимальная фаза запаздывания – сплошная линия, другие фазы – штриховая и пунктирная линии. Стационарные состояния, полученные при численном моделировании, показаны черными точками.

Для изучения динамики и условий устойчивости равновесных состояний гиротрона с внешним резонансным отражателем в Разделе 5.2 исследованы

уравнения связанных колебаний автогенератора-гиротрона и внешнего резонатора [31*,32*,42*,43*], приведенные в п.5.2.1. В п.5.2.2 получены аналитические выражения для модуляционных характеристик гиротрона при изменении собственной частоты резонатора гиротрона, совпадающие с найденными в Разделе 5.1. В п.5.2.3 исследована устойчивость стационарных состояний при оптимальной фазе запаздывания. Анализ устойчивости показывает, что стабильные по частоте состояния устойчивы. При любых начальных возмущениях система возвращается в состояние равновесия в три этапа [42*,43*], поскольку при условии (8) декременты оказываются различны: $\lambda_1 \gg \lambda_2 \gg \lambda_3$. На первом этапе быстрее всего, с максимальным декремен-

ном волноводе и получено уравнение баланса мощностей в многомодовом гиротроне при воздействии внешнего или отраженного сигнала. Рассмотрены возможности упрощения алгоритма численного моделирования уравнений при исследовании взаимодействия мод неэквидистантного спектра, включая моды встречного вращения.

В Разделе 1.1 получено уравнение возбуждения поля рабочей моды при воздействии внешнего квазимонохроматического сигнала, поступающего в резонатор гиротрона из выходного волновода². Рассмотрена традиционная схема гиротрона с резонатором в виде отрезка слабонерегулярного осесимметричного волновода круглого сечения, имеющего закритическое сужение на катодном конце и плавно сопряженного с выходным волноводом на другом конце [75]. Предполагается, что все спектральные составляющие электромагнитного поля лежат вблизи критической частоты рабочей моды волновода сравнения, имеющего такой же радиус, как резонатор в данном сечении. Длина резонатора достаточно велика, так что поперечная структура поля не зависит от продольной координаты. Последнее предположение, наряду с допущением о фиксированном продольном распределении поля, позволяет считать амплитуду поля равной произведению функций, зависящих от продольной, поперечной координат и времени по отдельности: $\vec{E}_0 = \text{Re}(u(z)CF_0(t)\exp(i\bar{\omega}_0 t)[\vec{z}_0, \nabla_{\perp}\Psi_0(\vec{r}_{\perp})])$, где $F_0(t)$ – комплексная амплитуда поля (индекс рабочей моды равен нулю), $\Psi_0(\vec{r}_{\perp}) = J_{m_0}(\kappa_0 r)\exp(-im_0\psi)$ – мембранная функция. В отсутствие внешнего сигнала и электронного пучка собственная комплексная частота ω_{compl} и собственная функция $u(z)$ «холодного» резонатора, описывающая продольное распределение поля, определяются из однородного уравнения неоднородной струны $u''_{zz} + (\omega_{compl}^2/c^2 - \kappa_0^2(z))u = 0$ [76] (рис.1).

Предполагается, что дифракционные потери и внешний сигнал слабо влияют на продольное распределение поля [2*,4*,44*], которое внутри резонатора гиротрона задается таким же, как в «холодном», без электронного пучка, резонаторе, а в выходном волноводе поле представляет собой сумму излученной и внешней волн, бегущих во встречных направлениях. По аналогии с рассмотрением омических потерь [68], в нулевом приближении электрическое и магнитное поля (поперечная компонента которого пропорциональна производной электрического поля по продольной координате z) совпадают с полями закрытого резонатора с идеально проводящими стенками (идеального резонатора). Электрическое поле нулевого приближения в вы-

² Рассматривается взаимодействие с ТЕ модами резонатора гиротрона. ТМ моды возбуждаются в гиротронах гораздо слабее, поскольку электронный пучок слаборефлективный, а частота колебаний близка к критической частоте [74].

ходном сечении равно нулю. В первом приближении электрическое поле в выходном сечении определяется из условий непрерывности, при этом тангенциальное магнитное поле предполагается равным полю нулевого приближения. Из волнового уравнения, усредненного по быстрым осцилляциям, в отсутствие омических потерь и электронного пучка, выведено уравнение возбуждения, описывающее дифракционные потери и воздействие внешнего сигнала. Это уравнение дополнено известными слагаемыми, соответствующими омическим потерям и взаимодействию с электронным пучком [7,72,73]:

$$\dot{F}_0 + iF_0(\omega - \omega_0) + \frac{\omega}{2Q_0}F_0 = iI_0F_0\chi_0 \frac{\omega}{2Q_0} + \frac{iB_{in}(t)\omega}{Q_{dif0}}. \quad (1)$$

Здесь F_0 , $B_{in}(t)$ – комплексные амплитуды поля рабочей моды и внешней волны, χ_0 – комплексная электронная восприимчивость электронного пучка для данной моды, Q_0 – полная добротность резонатора, Q_{dif0} – дифракционная добротность для данной моды.

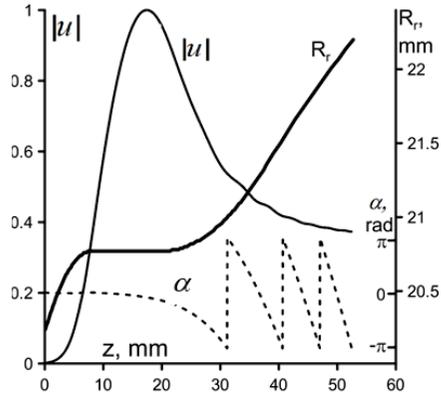


Рис.1. Структура поля в резонаторе гиротрона на частоте 170ГГц. $R_r(z)$, $|u(z)|$, $\alpha(z)$ – зависимость радиуса резонатора, модуля и фазы поля $u(z) = |u(z)|e^{i\alpha(z)}$ от продольной координаты.

Следует отметить, что уравнение возбуждения получено при произвольной амплитуде внешнего сигнала, в том числе сравнимой с амплитудой излученной волны. В случае малого поля внешнего сигнала (по сравнению с полем излучения)

уравнение совпадает с приведенным в [46]. В режиме захвата частоты найдены амплитуды стационарных состояний в зависимости от частоты внешнего сигнала (амплитудно-частотные характеристики). Показано, что в случае малого сигнала ширина полосы захвата совпадает с найденной в [46] $|\delta\omega|_{\max} \approx |B_{in}| / (Q_{dif0} |F_0|)$.

В Разделе 1.2 получено уравнение возбуждения рабочей моды в одномодовом гиротроне с отраженной волной (R – коэффициент отражения), поступающей в резонатор гиротрона из сопряженного с ним выходного волновода [4*,36*,44*]:

$$\frac{dF_0}{dt} + \left(\frac{\bar{\omega}_0}{2Q_0} + i(\bar{\omega}_0 - \omega_0) \right) F_0 + \frac{\bar{\omega}_0}{Q_{0dif}} \sum_{k=1}^n R^k e^{-i\bar{\omega}_0 k \tau_{ph}} F_0(t - k\tau_{gr}) = i \frac{\bar{\omega}_0}{2Q_0} I_0 F_0 \chi_0 \quad (2)$$

[29,30]. Конкуренция мод с прямым и встречным вращением полей позволяет объяснить результаты экспериментов, в которых наблюдались периодические изменения поперечной структуры поля на периферии излученного волнового пучка в гиротроне с колеблющимся отражателем [43,36*-39*]. Взаимодействие мод (рабочей и моды встречного вращения) исследовано на основе квазилинейных укороченных уравнений для комплексных амплитуд мод внутри резонатора [7,33*-36*] в идеализированной модели, в которой козырьковый выходной преобразователь и выходной тракт выводят 100% мощности излучения на рабочей моде в виде гауссова пучка. В такой модели отраженная волна возвращается в гиротрон только в виде моды с противоположным направлением вращения поля. Показано, что в отсутствие отражения стартовые условия выполнены только для рабочей моды. При отражении в гиротроне устанавливается двухмодовый режим, при этом амплитуда моды встречного вращения мала по сравнению с рабочей модой. Если отражатель колеблется (фаза отраженной волны меняется), то амплитуда моды встречного вращения также оказывается промодулированной во времени с периодом колебаний отражателя. На выходе гиротрона излучение может представлять собой суперпозицию двух волн: основной и малой примеси вторичной (соответствующей моде встречного вращения), причем на периферийной части гауссова пучка амплитуды этих волн могут оказаться соизмеримыми. Колебания удаленного отражателя приводят к изменению поперечной структуры поля на периферии волнового пучка, что и наблюдалось экспериментально.

Подобные явления переключения между двумя модами были исследованы также в ряде других работ диссертанта: теоретически для гиротрона с отраженной волной, воздействующей на одну из мод [25*] и экспериментально для гиротрона/гироклистрона на частоте 35 ГГц при введении селективной запаздывающей обратной связи, обеспечивавшей предварительную модуляцию электронного пучка на частоте одной из мод [27*]. Воздействие запаздывающей обратной связи можно рассматривать как аналог влияния отраженной волны.

В Главе 5 исследована стабилизация частоты гиротрона при отражении части излучения от внешнего высокодобротного резонатора. Исследование проведено в предположении о фиксированной продольной структуре поля в рамках модели с одной поперечной модой. Как показано в работах [60-66,4*,12*,20*,21*,42*,43*], для стабилизации частоты излучения автогенератора внешним высокодобротным резонатором необходимо выполнение условия

$$Q / Q_{ex} \ll |R| \ll 1 \quad (8)$$

и возвращение отраженной волны в генератор в определенной фазе. Здесь Q_{ex} и Q – добротности внешнего резонатора и резонатора гиротрона, R – максимальное значение коэффициента отражения.

состояний и значений циклотронной расстройки, при которых происходят переходы между этими состояниями (рис.16,а).

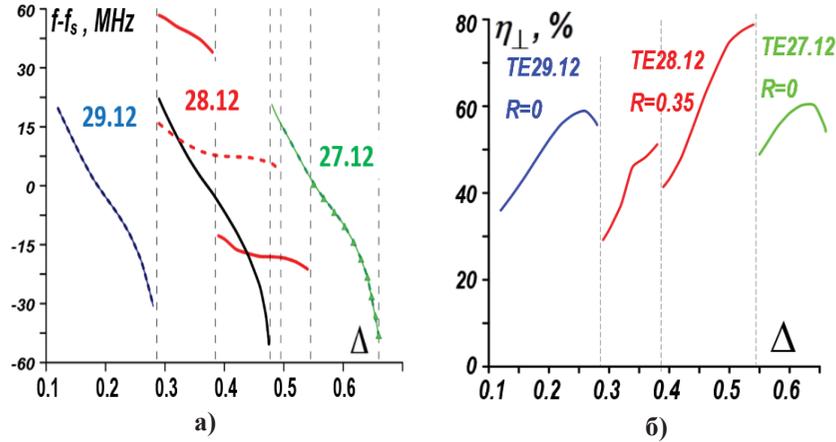


Рис. 16. Зависимости расстройки частот излучения на разных модах f и собственных частот этих мод f_s от циклотронной расстройки Δ (а): в отсутствие отражения (черная линия для рабочей моды TE_{28.12}, сплошные цветные для других мод) и с отражателем (пунктирная синяя линия для моды TE_{29.12}, для рабочей моды TE_{28.12} сплошные красные при расстоянии до отражателя 135 см и пунктирная красная при расстоянии 136.89 см; помеченная треугольниками зеленая линия для моды TE_{27.12}); зависимости поперечного КПД от Δ при расстоянии до отражателя 135 см (б). $I=45A$, $U=100кВ$.

Было рассмотрено влияние низкочастотных шумов ускоряющего напряжения на флуктуации частоты и фазы излучения. Относительная амплитуда шумов составляла 0.2% (0.2 кВ). Показано, что влияние шумов источника ускоряющего напряжения на колебания частоты и фазы при воздействии отраженной волны снижается, так что отклонения частоты от среднего значения уменьшаются в 10 раз, фазы - в 20 раз, что может быть актуальным для практических приложений. Воздействие отраженной волны может быть полезным для достижения стабильной частоты излучения, поскольку этот эффект не зависит от характерных времен низкочастотных шумов гиротрона. Вместе с тем использование отраженной волны для стабилизации фазы излучения представляется проблематичным, поскольку отклонения фазы возрастают пропорционально характерным временам шумов. Более предпочтительным в этом случае выглядит воздействие внешнего монохроматического сигнала, когда могут быть уменьшены как частотные, так и фазовые флуктуации [5*].

Помимо стабилизации частоты в данной главе в Разделе 4.5 исследована возможность возбуждения моды со встречным азимутальным вращением полей относительно рабочей моды при воздействии отраженной волны [36*] в гиротроне с встроенным однонаправленным козырьковым преобразователем

При этом допускается, что в выходном волноводе может быть дисперсия, приводящая к отличию фазовой и групповой скоростей волн. Время запаздывания амплитуды отраженной волны τ_{gr} определяется групповой скоростью, время запаздывания фазы отраженной волны τ_{ph} - фазовой скоростью. Уравнение возбуждения получено для произвольной величины коэффициента отражения. В случае малого отражения уравнение совпадает с уравнениями возбуждения, приведенными в [56].

В Разделе 1.3 приведена самосогласованная система уравнений многомодового гиротрона [1*-6*,26*]: уравнения возбуждения мод

$$\frac{2Q_s}{\bar{\omega}_s} \frac{dF_s}{dt} + F_s + i \frac{2Q_s}{\bar{\omega}_s} (\bar{\omega}_s - \omega_s) F_s - \frac{2Q_0}{Q_{0dif}} i \delta_{s0} |B_{in}| e^{i\varphi(t)} = i I_s F_s \chi_s \quad (3)$$

и уравнения движения электронов

$$\frac{dp}{d\zeta} + i(\Delta + |p|^2 - 1)p = i \sum_s F_s u(\zeta) \exp(i\Phi_s) \quad (4)$$

с начальными и граничными условиями $F_s(t=0) = F_s^{(0)}$, $p(\zeta=0) = \exp(i\vartheta)$, $0 \leq \vartheta < 2\pi$. Здесь s - индекс моды, δ_{s0} - символ Кронекера, p - безразмерный поперечный импульс электрона, ζ - безразмерная продольная координата, I_s - параметр тока, $\Delta = (2/\beta_{\perp}^2)(1 - \omega_H^0/\gamma\bar{\omega}_0)$ - безразмерная расстройка между циклотронной частотой электронов на входе в резонатор ω_H^0/γ и опорной частотой рабочей моды $\bar{\omega}_0$; $\bar{\omega}_s, \omega_s$ - опорная и собственная частоты s -й моды, γ - масс-фактор электронов во входном сечении, $\chi_s = \frac{1}{F_s} \int_0^{\zeta_{ex}} u^*(\zeta) \langle \langle p \rangle_{\vartheta_0} \exp(-i\Phi_s) \rangle_{\psi} d\zeta$ - электронная восприимчивость

для s -й моды, фигурные скобки означают усреднение по начальной фазе циклотронного вращения и по азимутальной координате ψ , $\Phi_s = (\bar{\omega}_s - \bar{\omega}_0)t - (m_s - m_0)\psi$ - разность фаз полей s -й и рабочей мод, m_s - азимутальный индекс s -й моды. Полностью обозначения введены в [2*,3*,15*].

Частоты взаимодействующих мод лежат в полосе циклотронного резонанса, ширина которой $2\pi/T_i$ обратно пропорциональна времени пролета электронов через пространство взаимодействия T_i . Моды, лежащие за пределами полосы циклотронного резонанса, не участвуют во взаимодействии. Предполагается, что ширина резонансной кривой ω_s/Q_s каждой моды с индексом s мала по сравнению с расстоянием по частоте между модами. Также считаем, что все спектральные составляющие внешнего сигнала или отраженной волны близки к частоте рабочей моды и лежат далеко за пределами резонансных кривых других мод:

$$|\omega_0 - \hat{\omega}| \ll \frac{\omega_s}{Q_s} \ll |\omega_s - \omega_s| \leq 2\pi/T_i, \quad (5)$$

где $\hat{\omega}$ - частота любой спектральной составляющей сигнала или отраженной волны.

Продольные распределения полей всех мод задаются совпадающими с нижней продольной модой резонатора, обладающей наибольшей добротностью и наименьшим стартовым током. Такое продольное распределение поля формируется в мощных гиротронах. Поперечные структуры полей внешнего сигнала и рабочей моды совпадают. При таких условиях линейный отклик всех мод, кроме рабочей, на воздействие внешнего или отраженного сигнала отсутствует, так что слагаемое, пропорциональное амплитуде внешнего сигнала, входит только в уравнение возбуждения рабочей моды (3). Однако изменение амплитуды рабочей моды под внешним воздействием вызывает изменения нелинейных составляющих высокочастотного тока электронного пучка на частотах всех взаимодействующих мод, имеющих достаточно большие коэффициенты связи с электронным пучком.

В Разделе 1.4 получено уравнение баланса мощностей при воздействии внешнего сигнала [15*]. Показано, что разность мощностей излучения и внешнего сигнала можно интерпретировать, в соответствии с методом возмущений, как мощность, отбираемую током фиктивного источника (эквивалентного дифракционным потерям и внешнему сигналу), расположенного в выходном сечении, у полей внутри резонатора. Аналогичный подход используется в [68], где показана эквивалентность мощности омических потерь и мощности, которую отбирают у поля фиктивные магнитные токи, расположенные вблизи боковых стенок резонатора. Найдено соотношение между полями внутри резонатора и в выходном волноводе, зависящее от амплитуды внешнего сигнала. При малом внешнем сигнале отношение амплитуды внешнего сигнала к амплитуде поля внутри резонатора совпадает с полученным в [46]: $|B_{in}/F_0| = \sqrt{P_{ex}/P_{0rad}}$. При произвольном внешнем сигнале соотношение

остается таким же, но значения амплитуды поля $|F_0|$ и мощности излучения P_{0rad} должны соответствовать автономному режиму генерации. В Разделе 1.5 предложен алгоритм численного моделирования уравнений гиротрона [2*] и показана возможность уменьшения времени расчетов путем уменьшения числа азимутальных фракций электронов.

В Приложении 1.1 представлен вывод уравнений генератора типа Ван-дер-Поля с внешним сигналом или отраженной волной на основе эквивалентной радиотехнической схемы. В Приложении 1.2 приведен подробный вывод формулы дифракционных потерь и уравнения баланса мощностей в гиротроне с внешним сигналом.

тродинамической системы (состоящей из резонатора гиротрона, линии задержки и отражателя)

при изменении длины линии задержки. Такая интерпретация справедлива при не слишком больших временах запаздывания и адекватно описывает экспериментальную ситуацию. В противоположном случае следует учитывать влияние длинной линии на частоту излучения, рассмотренное в Разделе 4.1. Расчетные результаты для данного гиротрона с отражениями, полученные на основе PIC-кода КАРАТ, также подтверждают результаты проведенного эксперимента [40].

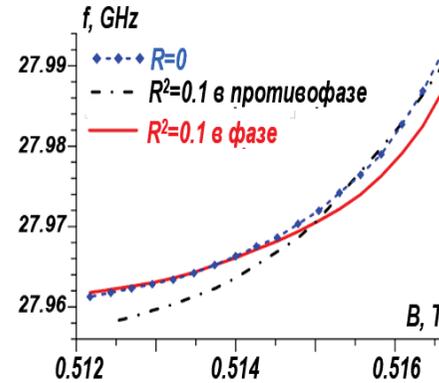


Рис. 15. Зависимость частоты излучения от ведущего магнитного поля при разных положениях отражателя (разной фазе отраженной волны).

В Разделе 4.4 и в работе [26*] исследована стабилизация частоты излучения гиротрона с удаленным отражателем (выходным окном) в условиях взаимодействия мод эквидистантного спектра, симметрично отстоящими по частоте. Предполагалось, что окно отражает излучение на частоте рабочей моды, а для соседних мод оно прозрачно. Расчеты проводились, как и в Главах 1-3, для гиротрона мегаваттного уровня мощности с рабочей частотой 170 ГГц, рабочей модой TE_{28,12}. Расстояние от гиротрона до отражающего окна составляло 135 см, время запаздывания 9 нс. Коэффициент отражения по амплитуде был равен 0.35. Показано, что отражение части излучения гиротрона на частоте рабочей моды при средних значениях тока может приводить к расширению зоны генерации на рабочей моде на 25% за счет подавления низкочастотной соседней моды (рис.16,а). При этом возрастает амплитуда поля, что приводит в области высоких расстроек циклотронного резонанса к повышению поперечного КПД генерации на 10-17% (рис.16,б).

Под воздействием отраженной волны частота излучения стабилизируется, и при изменении ведущего магнитного поля изменения частоты излучения в 5-8 раз меньше, чем в гиротроне без отражений (рис.16,а). Однако при изменениях ведущего магнитного поля или напряжения в пределах зоны генерации рабочей моды могут происходить переходы между продольными модами линии запаздывания и соответствующие им скачки частоты и амплитуды между стабильными состояниями. Смещение отражателя в пределах нескольких длин волн не влияет на стабильность частоты, а может приводить лишь к небольшому (менее обратного времени задержки) сдвигу частот стабильных

представлял собой участок волновода меньшего диаметра, расположенный на расстоянии 60 см от выходного сечения резонатора гиротрона. Коэффициент отражения по мощности составлял около 10%. Для изменения положения отражателя участок волновода перемещался в продольном направлении при помощи шагового электродвигателя, что позволило исследовать влияние длины линии задержки без выключения гиротрона. Для измерения спектральных характеристик часть излучения направлялась в спектроанализатор Keysight N9010A, измерения мощности выходного сигнала производились при помощи калиброванного водяного калориметра. Ток электронного пучка и выходная мощность гиротрона в эксперименте были выбраны существенно меньшими максимально достижимых значений для уменьшения тепловых нагрузок на элементы электродинамической системы и обеспечения стабильности режима генерации: ускоряющее напряжение составляло 16 кВ, ток электронного пучка – 0.5 А, питч-фактор электронов $g = 1.3$, при этом максимальная мощность без отражений порядка 1.85 кВт и КПД 19%.

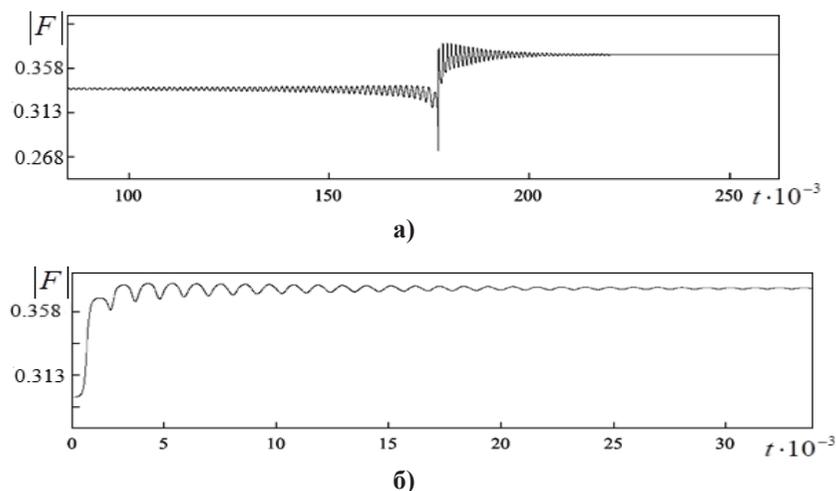


Рис. 14. Зависимости амплитуды колебаний от времени в ходе переходных процессов для состояний равновесия, показанных на **рис. 12**: а) переход от 6-й моды, неустойчивой относительно распада на сателлиты, к 4-й; б) переход от 3-й моды, неустойчивой относительно возмущений на собственной частоте, к 4-й моде.

При оптимальной фазе отраженного сигнала происходила стабилизация частоты (максимум в 1.5 раза), **рис. 15**, и возрастание мощности. Период частоты и мощности излучения при изменении положения отражателя был равен половине длины волны излучения в выходном волноводе $\lambda_w/2=7.5$ мм, что можно объяснить периодическими изменениями полной добротности элек-

В **Главе 2** рассмотрено воздействие на гиротрон внешнего монохроматического сигнала, поступающего из выходного волновода. В **Разделе 2.1.** рассмотрены преимущества захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом и режимы генерации вне зон захвата. В **п. 2.1.1-2.1.3** теоретическое исследование выполнено для двух гиротронов: разработанного в ИПФ РАН в качестве прототипа для ITER гиротрона на частоте 170 ГГц с рабочей модой $TE_{28,12}$ [1,4,33], и гипотетического гиротрона с вдвое более высокими частотой 345 ГГц и индексами рабочей моды $TE_{56,24}$ [1,6*]. Параметры второго гиротрона (высокая частота и плотность спектра мод) позволяют особенно наглядно продемонстрировать преимущество режима захвата частоты внешним сигналом: продвижение в область оптимальных параметров в результате подавления паразитных мод и увеличение мощности по сравнению с автономным режимом почти в два раза, до уровня, превышающего 1.2 МВт. В **п.2.1.1.** приведены параметры гиротронов, сценарий включения, указаны взаимодействующие моды и характеристики внешнего сигнала. В обоих гиротронах резонатор представляет собой отрезок цилиндрического волновода с закритическим сужением на катодном конце и плавным расширением в сторону выходного тракта. Добротности всех взаимодействующих мод близки к добротности рабочей моды: $Q_0=1370$ в гиротроне на частоте 170 ГГц и $Q_0=3670$ в гиротроне на частоте 345 ГГц. Омическая добротность составляет для гиротронов на частоте 170 ГГц и 345 ГГц соответственно 55730 и 81800, что существенно превышает полную добротность, поэтому в дальнейших расчетах предполагается, что дифракционная и полная добротности совпадают. Условие приближения фиксированной продольной структуры поля [69,72] выполнено для обоих гиротронов.

Предполагается, что сценарий включения гиротрона близок к реально используемому в экспериментах для установления режима высокого КПД в мощных гиротронах [77,8*,9*] (**рис.2**). В соответствии с эффектом Шоттки при увеличении напряжения соответствующим образом растет ток пучка, энергия и питч-фактор электронов, а также расстройка циклотронного синхронизма [78,1*-6*,8*,9*,15*-17*] (**рис.2**) Установление ускоряющего напряжения, тока, питч-фактора происходит за время, существенно превышающее характерные времена всех переходных процессов в системе, что позволяет решать уравнения гиротрона, считая параметры постоянными на каждом шаге интегрирования.

Во взаимодействии участвуют моды, находящиеся в полосе циклотронного резонанса и имеющие достаточно высокие коэффициенты связи с электронным пучком, сравнимые с коэффициентом связи рабочей моды. В гиротроне на частоте 170 ГГц рассмотрено взаимодействие рабочей моды $TE_{28,12}$ с модами эквидистантного спектра $TE_{26,12}$, $TE_{27,12}$, $TE_{29,12}$, $TE_{30,12}$ и модами встречного вращения полей относительно рабочей моды $TE_{-25,13}$, $TE_{-26,13}$; в гиротроне на частоте 345 ГГц – рабочей моды $TE_{56,24}$ с модами эквидистантного спектра

TE_{55.24}, TE_{57.24}, TE_{54.24}, TE_{58.24}, TE_{53.24}, TE_{59.24} и модами со встречным вращением полей TE_{-53.25}, TE_{-54.25}.

В п.2.1.2 на основе численного моделирования уравнений, выведенных в Главе 1, исследованы режимы автономной генерации и захвата частоты рабочей моды внешним сигналом. Найдены зоны захвата и зоны одномодовой генерации рабочей моды в автономном режиме на плоскостях различных параметров гиротронов: тока пучка и ведущего магнитного поля (или расстройки циклотронного резонанса, линейно зависящей от ведущего магнитного поля), а также частоты внешнего сигнала и циклотронной расстройки [1*-6*]. Показано, что основным фактором, препятствующим установлению одномодовых колебаний со стабильной частотой и высоким КПД, является возбуждение паразитных мод. Паразитные моды возникают в процессе включения гиротрона на фронте импульса напряжения, однако внешний сигнал в ряде случаев может их подавить, полностью или частично. В автономном гиротроне при продвижении в область оптимальных КПД (больших циклотронных расстроек) генерация на рабочей моде срывается, возбуждается паразитная низкочастотная мода. При воздействии внешнего сигнала в режиме захвата возможно продвижение параметров гиротрона в область оптимальных КПД (рис.3). При этом мощность может увеличиться: в гиротроне на частоте 170 ГГц на 10-11%, в гиротроне на частоте 345 ГГц – почти в два раза. При построении рис.3 частота внешнего сигнала задавалась одинаковой во всей зоне, близкой к частоте автономной генерации в области оптимальных КПД.

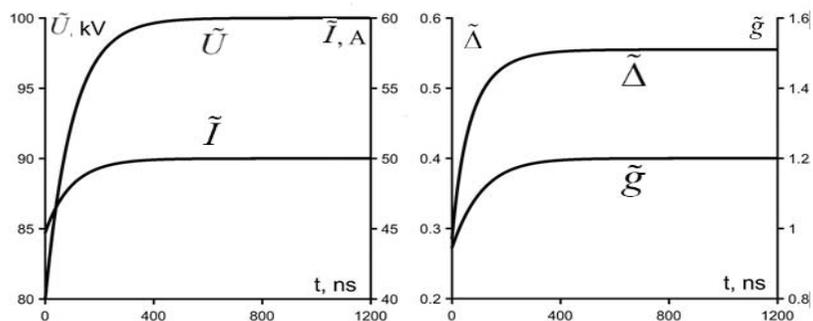


Рис.2. Временные зависимости напряжения, тока, питч-фактора и расстройки циклотронного резонанса в процессе включения гиротрона на частоте 170ГГц.

Построение зон на плоскости "частота внешнего сигнала – циклотронная расстройка" при заданном токе пучка показало, что возможно увеличение ширины зоны одномодовой генерации в гиротроне на частоте 170 ГГц при токе 50 А в 6 раз при относительной мощности внешнего сигнала 4%; в гиротроне на частоте 345 ГГц при токе 30 А – в 2 раза при относительной мощности внешнего сигнала 4% (рис.4).

В п.4.2.2 исследована устойчивость стационарных состояний относительно роста амплитуды исходного состояния. Показано, что если в системе существует единственное стационарное состояние, то оно устойчиво. При увеличении времени запаздывания попарно возникают новые стационарные состояния. Устойчивые и неустойчивые относительно амплитудных возмущений состояния чередуются по частоте (рис.12). В п.4.2.3 анализируется устойчивость стационарных состояний относительно распада на боковые сателлиты в области оптимальных параметров, когда превышение параметров гиротрона (тока) над стартовыми значениями достаточно велико. Исследование проведено методом D-разбиения [91]: найдены параметры системы, при которых частотная отстройка сателлитов действительна. При малом изменении параметров вблизи этих значений устойчивые сателлиты становятся неустойчивыми. Показано, что в оптимальных режимах генерации (при существенном превышении тока над стартовым) неустойчивыми относительно параметрического распада могут оказаться только крайние по частоте стационарные состояния (рис.12), в которые система не попадает без специального внешнего воздействия на их частоте [33*]. Таким образом, если стационарное состояние единственное, то оно устойчиво относительно возмущений всех типов.

В п.4.2.4 численными методами исследовано характеристическое уравнение и построены границы областей устойчивости стационарных состояний относительно распада на сателлиты при произвольном превышении тока над пороговым значением. Показано, что при малых превышениях тока над пороговыми значениями возможен рост возмущений в виде боковых сателлитов.

Переходные процессы исследовались на основе численного решения исходного уравнения генератора Ван-дер-Поля с запаздыванием [33*]. Было показано, что они происходят в точном соответствии с приведенными выше результатами исследования устойчивости относительно обоих типов возмущений (рис. 14). Когда неустойчивость возникает в результате распада на сателлиты, наблюдается длительная стадия нарастающих осцилляций амплитуды, частота которых близка к разности частот соседних стационарных состояний. Затем среднее значение амплитуды скачком увеличивается и переходит в окрестность соседнего устойчивого состояния (рис.14,а). Если же начальное состояние соответствует продольной моде, неустойчивой относительно амплитудных возмущений, то на начальной стадии возмущение нарастает экспоненциально (рис.14,б).

В Разделе 4.3 результаты теоретического анализа сопоставляются с данными, полученными в эксперименте по стабилизации частоты гиротрона с удаленным нерезонансным отражателем [10*,11*]. Эксперимент проводился А.А.Богдашовым и А.П.Фокиным. В качестве экспериментальной установки использовался технологический гиротронный комплекс с частотой генерации 28 ГГц и мощностью до 15 кВт, работающий на второй гармонике циклотронной частоты на симметричной моде TE₀₂ [92]. Нерезонансный отражатель

тронов в [90], однако из-за перескоков частоты этот эффект рассматривался как паразитный.

В Разделе 4.2 [33*-35*] исследована устойчивость стабилизированных по частоте стационарных состояний в приближении малой амплитуды поля, когда функция электронной восприимчивости в гиротроне с мягким возбуждением квадратично зависит от амплитуды поля [7,33*-36*]. При этом уравнения гиротрона совпадают с укороченным уравнением Ван-дер-Поля [58,33*-36*]. В области реальных значений параметров (малое отражение, оптимальная мощность излучения) такой подход позволил аналитически исследовать устойчивость стационарных состояний системы (п.4.2.1-4.2.3). При малых превышениях параметров над стартовыми значениями устойчивость стационарных состояний исследована численно (п.4.2.4, [35*]).

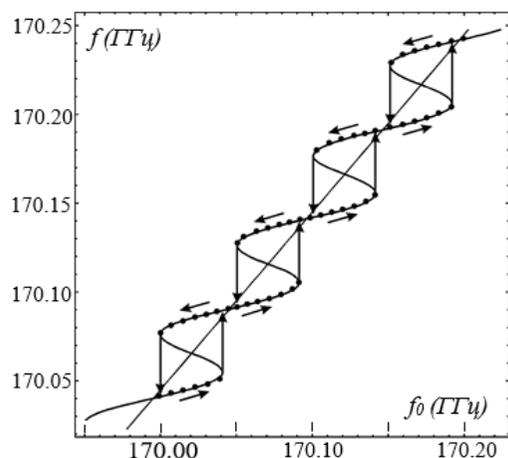


Рис. 13. Численная (точки) и аналитическая, построенная по формуле (7) (сплошная кривая) зависимости частоты излучения $f = \omega / 2\pi$ от собственной частоты $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ при $R=0.2$, $f_0\tau = 3000,5$, $I_A = 45$ А, $U = 73$ кВ, $\Delta = 0.5$.

В п.4.2.1 получено характеристическое уравнение для частот возмущений системы. Показано, что устойчивость и поведение системы определяются тремя параметрами: коэффициентом отражения R , временем запаздывания τ , превышением тока над стартовым значением. Возникающие возмущения амплитуды и фазы поля можно отнести к одному из двух типов: возмущения амплитуды поля, частота которых равна частоте стационарного состояния, и возмущения в виде двух боковых сателлитов, симметрично отстоящих по частоте от исходного стационарного состояния: $2\omega_0 = \omega_+ + \omega_-^*$. Распад исходного стационарного состояния на боковые сателлиты аналогичен параметрическому четырехфотонному распаду двух фотонов исходного состояния на фотоны-сателлиты. При параметрическом распаде частота возмущений-сателлитов в общем случае не совпадает с частотой соседних стационарных состояний, поскольку стационарные состояния не образуют эквидистантный спектр (рис.12). Поэтому параметрический распад может наблюдаться только на начальной стадии ухода системы из неустойчивого стационарного состояния. Затем устанавливается одно из соседних стационарных состояний.

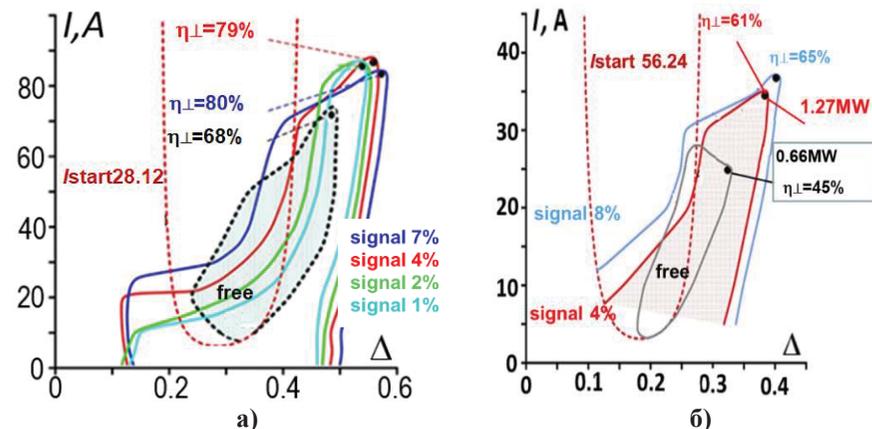


Рис. 3. Зоны одномодовой генерации на плоскости «ток - расстройка Δ » в гиротроне на частоте 170 ГГц (а) и 345 ГГц (б) при напряжении $U=100$ кВ, пичт-факторе $g=1.2$. Разность частот сигнала и резонатора гиротрона -30 МГц (а) и -24 МГц (б). Области одномодовой генерации в автономных режимах ограничены черным пунктиром (а) или серой кривой (б).

Важным ограничением рабочих режимов непрерывных гиротронов с внешним сигналом является возрастание тепловых нагрузок при высоких значениях токов и мощностей, особенно при захвате частоты. Однако преимущества режима захвата – возрастание мощности и КПД – сохраняются и в области, где тепловые нагрузки не превышают предельно допустимый уровень 2 кВт/см²: в 170 ГГц гиротроне при токах до 50А, а в 345 ГГц гиротроне даже при максимально достижимых токах и мощностях.

В п. 2.1.3 рассмотрены режимы генерации, возникающие при выходе параметров гиротрона или внешнего сигнала из зон захвата или, для автономных гиротронов, из зон одночастотной генерации на рабочей моде. Показано, что выход из зон захвата в свободных гиротронах происходит в результате возбуждения паразитных мод. В гиротроне с внешним сигналом выход из зон захвата, помимо возбуждения паразитных мод, может сопровождаться биениями на рабочей моде.

Исследовано возникновение параметрического распада рабочей моды и возбуждение боковых сателлитов рабочей моды с близкими амплитудами ($TE_{27.12}$ и $TE_{29.12}$ в гиротроне на частоте 170 ГГц, $TE_{55.24}$ и $TE_{57.24}$ в гиротроне на частоте 345 ГГц), симметрично отстоящих по частоте от рабочей моды, вблизи середины верхних границ зоны захвата. При этом частоты и азимутальные индексы мод связаны соотношениями $2\omega_0 = \omega_1 + \omega_{-1}$, $2m_0 = m_1 + m_{-1}$, аналогичными закону сохранения энергии и импульса при четырехфотонном распаде двух квантов исходной волны на два кванта боковых сателлитов (здесь

$\omega_{\pm 1}$, $m_{\pm 1}$ - частоты и азимутальные индексы сателлитов). Показано, что в гиротроне на частоте 170 ГГц при воздействии внешнего сигнала параметрический распад возможен при токах выше 70 А, тогда как в автономном режиме распад на боковые сателлиты может наблюдаться только при гораздо больших токах, выше 100 А, далеко отстоящих от границы области однододовой генерации [3*,4*] (рис. 5). Возможность возбуждения симметрично отстоящих от рабочей моды сателлитов для гиротронов и других электронных мазеров в автономном режиме обсуждается в работах [79,80].

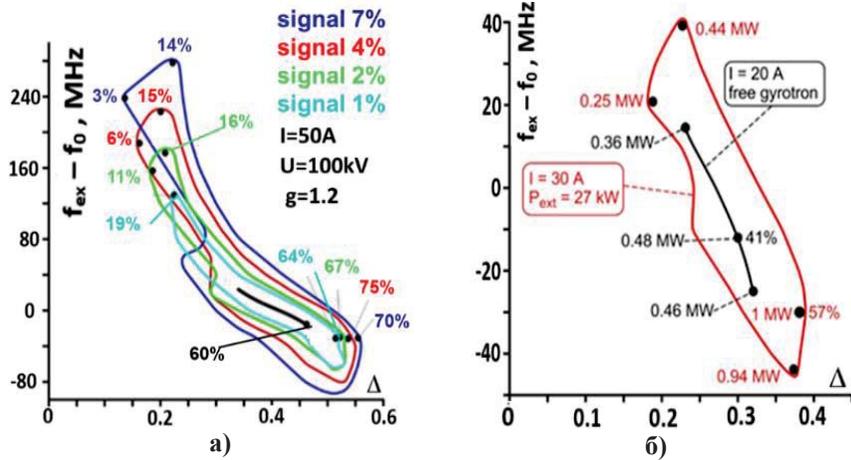


Рис. 4. Зоны захвата на плоскости «частота внешнего сигнала – циклотронная расстройка Δ » в гиротронах на частоте 170 ГГц (а) и 345 ГГц (б) при $U=100\text{kV}$, $g=1.2$. Зоны построены при токах $I=50\text{A}$ (а) и $I=30\text{A}$ (б). Черные кривые соответствуют зависимости частоты генерации от Δ в автономных гиротронах.

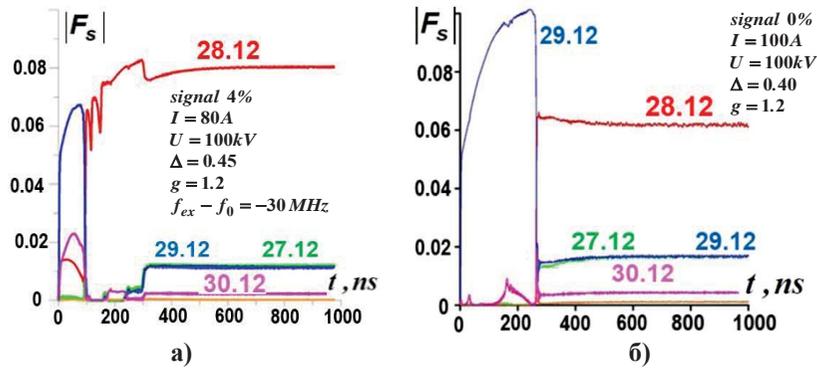


Рис. 5. Параметрический распад рабочей моды на боковые сателлиты в режиме захвата (а) и при автономной генерации (б) в гиротроне на частоте 170 ГГц.

Путем сравнения частоты излучения в двух соседних стационарных состояниях (различающихся значением какого-либо параметра, например, циклотронной расстройки или собственной частоты резонатора гиротрона) показано, что частота излучения стабилизируется и меняется в относительно небольшом интервале, когда выполнено условие

$$|R|\tau\bar{\omega}_0/Q_0 > 1. \quad (6)$$

Условие стабилизации частоты (6) совпадает с условием существования нескольких (более одного) стационарных состояний системы. При этом в эффективную полосу захвата частоты внешним сигналом, амплитуда которого равна амплитуде отраженной волны, попадает более одной продольной моды линии запаздывания. Другими словами, эффективное время захвата частоты гиротрона (обратное эффективной ширине полосы захвата) должно быть меньше времени запаздывания [4*,20*-24*,26*].

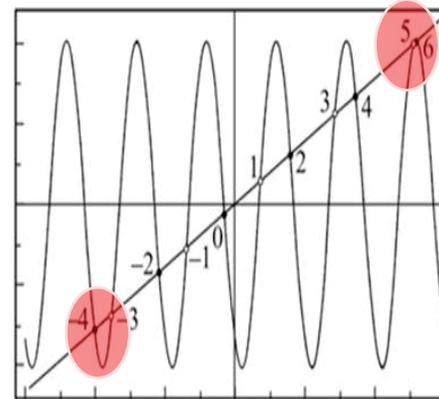


Рис. 12. Графическое решение уравнения для частот стационарных состояний $\omega = \omega_f + |R|\omega_0 \sin(\omega\tau)/Q_0$. Здесь ω_f - частота в автономном режиме (без отражения). По вертикальной оси отложено $\omega - \omega_f$, по горизонтальной – $\omega\tau$. Устойчивые относительно амплитудных возмущений состояния отмечены черными точками, неустойчивые – белыми, розовыми кругами обведены состояния, которые могут быть неустойчивы относительно параметрического распада.

Аналитически и численно найдены зависимости частоты излучения от циклотронной расстройки и от собственной частоты резонатора гиротрона (модуляционные характеристики), рис 13. Аналитическая зависимость собственной частоты резонатора гиротрона от частоты излучения имеет вид:

$$\omega_0(\omega) = \omega + \Delta\omega - \bar{\omega}_0 R \sin(\omega\tau) / Q_0 \quad (7)$$

где $\Delta\omega$ – сдвиг частоты генерации в автономном (без отражения) гиротроне относительно собственной частоты ω_0 , $\bar{\omega}_0$ - опорная частота. При изменении параметров гиротрона частота излучения плавно меняется в узком интервале до тех пор, пока продольная структура поля в линии запаздывания соответствует одной из продольных мод, затем происходит скачок частоты на другую продольную моду (рис.13).

Следует отметить, что влияние отражения при большой длине линии запаздывания на модуляционные характеристики ранее исследовалось для магне-

Если амплитуда модуляции параметров внешнего сигнала достаточно велика, но период модуляции мал в масштабе времени захвата, то паразитные моды не возбуждаются, поскольку амплитуда и частота излучения не успевают отслеживать изменения параметров внешнего сигнала и колеблются в меньшем интервале значений, чем при более медленной модуляции (рис.11,б).

В Разделе 3.3 приведены общие закономерности перехода к различным режимам при воздействии квазимонохроматического внешнего сигнала.

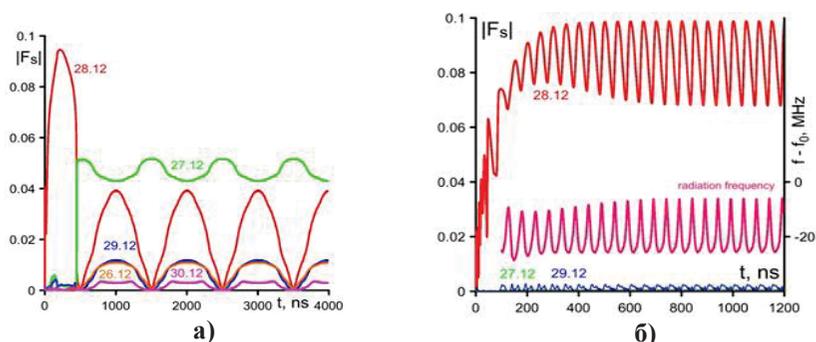


Рис. 11. Воздействие двух монохроматических сигналов одинаковой амплитуды, различающихся по частоте на 1 МГц (а) и в случае, когда амплитуда второго сигнала вдвое меньше, а разность частот сигналов 20 МГц (б).

В Главе 4 исследованы режимы генерации гиротрона с удаленным нерезонансным отражателем – стабилизация частоты и переключение между продольными модами длинной линии запаздывания при изменении параметров отражателя. Как и в других главах, исследование проведено в приближении фиксированной продольной структуры поля [69]. Предполагается, что для каждой из взаимодействующих мод коэффициент отражения R не зависит от частоты или эта зависимость слабая: $|R/R'_\omega| \gg \omega_s/Q_s$, так что его можно считать постоянным в пределах ширины линии данной моды.

В Разделе 4.1 аналитически продемонстрирована возможность стабилизации частоты излучения одномодового (с одной поперечной модой) гиротрона [4*,20*-24*]. Рассмотрены стационарные состояния системы, состоящей из гиротрона, линии запаздывания и нерезонансного отражателя. Число этих состояний (продольных мод), различающихся продольной структурой поля в линии запаздывания, конечно и может быть больше единицы, если время запаздывания τ достаточно велико (рис.12). При этом в резонаторе гиротрона продольное распределение поля является одногорбым, совпадающим с полем наиболее добротной продольной моды «холодного» (без электронного пучка) резонатора.

В Разделе 2.2 исследована возможность снижения флуктуаций частоты и фазы излучения при воздействии внешнего сигнала на гиротрон с низкочастотными шумами напряжения и тока [5*]. В реальных источниках питания гиротронов даже после фильтрации высокочастотных составляющих шумов могут наблюдаться незначительные низкочастотные технические флуктуации напряжения с характерным временем 1-1000 мкс [9,10]. Такой шум можно представить как набор гармоник с близкими частотами и медленно меняющимися во времени амплитудами. Следует отметить, что проблема влияния внешнего сигнала на генератор с шумами и возможность уменьшения флуктуаций фазы обсуждалась ранее на основе спектрально-корреляционного анализа как для генераторов с квадратичной нелинейностью [67,81], так и для гиротронов [82]. Численное моделирование, как и в Разделе 2.1, проведено на примере мощных гиротронов с рабочими частотами 170 ГГц и 345 ГГц. Рассмотрение ограничено гиротроном с гармонической модуляцией входных параметров электронного пучка – напряжения, тока и пич-фактора. Размах модуляции напряжения задавался равным 0.2 кВ, т.е. 0.2% от номинального напряжения 100 кВ, что соответствует реальным техническим флуктуациям [10]. Как показали расчеты, в режиме свободной генерации для обоих гиротронов при амплитуде колебаний напряжения $\Delta U=0.2\text{кВ}$ происходит существенное изменение частоты и фазы поля излучения: фаза колеблется в интервале порядка нескольких десятков градусов, частота – в интервале около нескольких мегагерц (рис.6,а). При воздействии внешнего сигнала флуктуации частоты и фазы существенно (почти на порядок) уменьшаются: фаза меняется в пределах нескольких градусов (рис.6,б), частота – менее чем на 0.4 МГц.

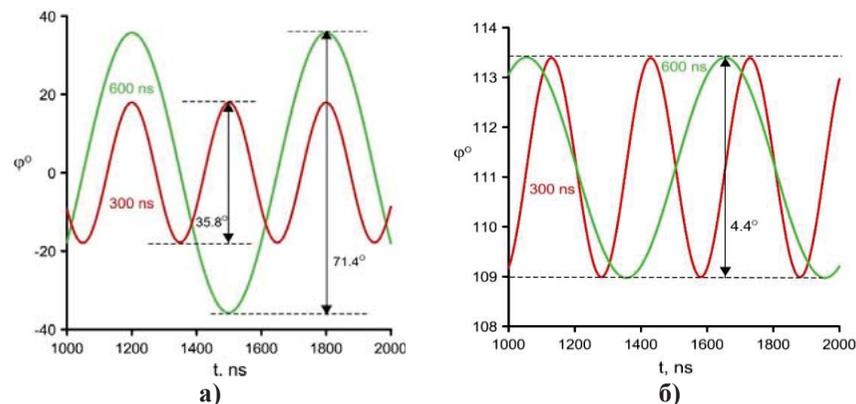


Рис.6. Временные зависимости фазы излучения в автономном режиме (а) и при захвате частоты внешним сигналом с относительным уровнем мощности 4% (б) для гиротрона на частоте 170ГГц, $I=50\text{А}$, магнитные поля оптимальны для достижения высоких КПД: $B=6.978\text{Т}$ (а), $B=6.927\text{Т}$ (б); красные кривые соответствуют периоду модуляции напряжения 300 нс, зеленые – 600 нс.

Результаты расчетов были сопоставлены с теоретическими оценками фазовых флуктуаций в гиротроне при скачке напряжения [83] и в генераторе Вандер-Поля [81] на основе анализа модифицированного уравнения Адлера. Показано качественное совпадение результатов. Проведенные расчеты представляют интерес для установления ограничений на допустимые флуктуации параметров гиротрона, что является актуальным для разработки в дальнейшем комплекса когерентно излучающих гиротронов.

В Разделе 2.3 рассмотрено влияние неидеальных характеристик электронного пучка (разброса поперечных скоростей электронов, позиционного разброса электронов, несоосности электронного пучка и резонатора гиротрона) на режимы работы свободного гиротрона и гиротрона, в который поступает внешний сигнал [19*].

Возможные причины разброса скоростей электронов и смещения радиусов ведущих центров электронных орбит относительно их идеальных значений связаны с особенностями формирования винтовых электронных пучков магнетронно-инжекторными пушками: шероховатостями поверхности эмиттера, разбросом электронов на катоде как по энергии, так и по направлению, неоднородностью излучающего кольца эмиттера, тепловыми неоднородностями, несоосностью электродов и магнитного поля, неадиабатическим движением электронов, неустойчивостями в процессе транспортировки пучка к резонатору гиротрона и эффектом пространственного заряда [84]. Как было показано в [85-87], разброс скоростей и конечная толщина пучка, как правило, снижают КПД одномодовой генерации на рабочей моде. Смещение оси пучка относительно оси резонатора (параллельное или с перекосом) может привести к срыву генерации на рабочей моде и возбуждению паразитных мод [86]. В [85-87] рассматривалось влияние неидеального электронного пучка на гиротрон в режиме свободной генерации. В данном разделе проведено сравнение характеристик мощного многомодового гиротрона с разбросом параметров электронного пучка в режиме свободной генерации и в режиме захвата частоты и фазы внешним монохроматическим сигналом. Численные расчеты проведены как для 170 ГГц гиротрона с параметрами, приведенными в п.2.1.1, так и для безразмерной модели гиротрона с эквидистантными модами, что позволяет исследовать характер режима генерации мощного гиротрона в зависимости от плотности спектра мод в общем виде.

Показано, что в мегаваттных гиротронах достижимы режимы с высоким КПД при относительном скоростном разбросе до 30-40%, смещении оси (параллельном переносе или перекосе) до величин порядка $\lambda/4$ и толщине пучка порядка $\lambda/3$. При больших значениях скоростного разброса, толщины и смещения оси происходит срыв одномодовой генерации и возбуждение левого сателлита при свободной генерации или двух симметрично отстоящих боковых сателлитов при воздействии внешнего монохроматического сигнала. Захват частоты внешним сигналом позволяет повысить КПД генерации на 6-8%, подавить возбуждение паразитных мод на фронте импульса ускоряющего

дуть периодические изменения частоты и амплитуды рабочей моды. Амплитуда излучения может повторять форму модуляции амплитуды сигнала, если биения амплитуды внешнего сигнала не слишком глубокие или достаточно быстрые. Если же биения амплитуды внешнего сигнала достаточно глубокие (так что в некоторые моменты времени амплитуда сигнала много меньше своего среднего значения) и медленные в масштабе времени захвата, то происходят глубокие биения частоты и амплитуды поля излучения на рабочей моде или возбуждаются паразитные моды (рис.11,а). При ступенчатой модуляции амплитуды сигнала, как и в случае ступенчатой модуляции частоты сигнала, возбуждение паразитных мод происходит при меньшем размахе и периоде модуляции, чем в случае гармонической модуляции амплитуды.

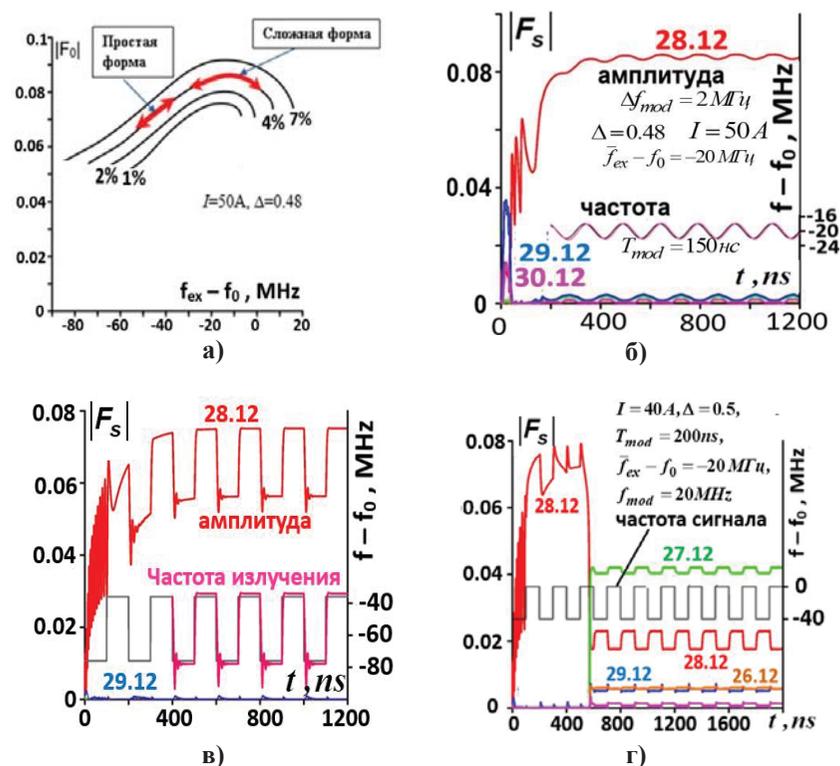


Рис. 10. Модуляция частоты внешнего сигнала: скольжение параметров по АЧХ (а); временные зависимости амплитуд мод, частот рабочей моды и сигнала (б-г); частоты сигнала и излучения совпадают (б); установление амплитуды и частоты на каждом скачке при ступенчатой модуляции (в), возбуждение паразитных мод (г).

ленных работах [43,88,89,37*-39*] влияние взаимодействия мод не изучалось, тогда как в мощных гиротронах конкуренция мод играет существенную роль в установлении того или иного режима генерации.

Численное моделирование в Главе 3, [15*-17*] проводилось на примере гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц, мощностью 1-1.5 МВт, рабочей модой $TE_{28,12}$. Ускоряющее напряжение во всех расчетах составляло $U=100$ кВ. Рассмотрено взаимодействие рабочей моды с соседними модами эквидистантного спектра $TE_{26,12}$, $TE_{27,12}$, $TE_{28,12}$, $TE_{29,12}$, $TE_{30,12}$ и модами $TE_{-25,13}$, $TE_{-26,13}$ со встречным направлением вращения полей по отношению к вращению электронов. Уровень мощности внешнего сигнала во всех расчетах составлял 4%.

В Разделе 3.1 исследовано воздействие на гиротрон внешнего сигнала с гармонической и ступенчато промодулированной частотой, близкой к частоте рабочей моды. Показано, что при одинаковых периоде и глубине модуляции в случае ступенчатой модуляции спектр внешнего сигнала шире, чем для гармонической модуляции. Проведена аналогия периодической модуляции частоты сигнала со скольжением параметров гиротрона вдоль одной из ветвей амплитудно-частотной характеристики (рис.10,а).

При воздействии промодулированного по частоте внешнего сигнала может происходить захват и управление частотой, когда мгновенная частота излучения отслеживает изменения частоты внешнего сигнала, а амплитуда излучения оказывается промодулированной во времени с периодом модуляции частоты внешнего сигнала. Такие режимы возможны, если изменения частоты внешнего сигнала достаточно медленные по сравнению с временем захвата, и мгновенная частота внешнего сигнала лежит внутри полосы захвата во все моменты времени (рис.10, б). При этом в случае гармонической модуляции частоты форма модуляции амплитуды поля излучения может быть как достаточно простой, близкой к синусоидальной, так и более сложной в зависимости от средней частоты сигнала. В случае ступенчатой модуляции частоты сигнала после каждого скачка частоты сигнала происходят затухающие колебания частоты и амплитуды поля излучения, соответствующие установлению их значений на данном скачке, так что форма модуляции частоты и амплитуды поля излучения не является строго ступенчатой (рис.10,в). Если частота внешнего сигнала выходит из полосы захвата, могут возникать биения рабочей моды или возбуждение паразитных мод (рис.10,г). В случае ступенчатой модуляции частоты сигнала возбуждение паразитных мод возникает при меньших значениях амплитуды и периода модуляции, чем в случае гармонической модуляции.

В Разделе 3.2 рассмотрено воздействие амплитудно-модулированного сигнала с гармонически и ступенчато промодулированной амплитудой и двух монохроматических внешних сигналов. Сигнал с гармонической модуляцией амплитуды эквивалентен трем монохроматическим сигналам.

Показано, что при воздействии амплитудно-модулированного внешнего сигнала или двух монохроматических сигналов на гиротрон могут происхо-

напряжения, а также в ряде случаев увеличить максимально допустимые значения разброса параметров и смещения оси электронного пучка.

В Разделе 2.4 обсуждаются результаты проведенного в ИПФ РАН первого экспериментального исследования захвата мощного релятивистского гиротрона на частоте 35 ГГц с уровнем мощности 0.9 МВт внешним сигналом магнетрона с мощностью до 25 кВт (до 2.8% от мощности излучения) [8*,9*] при использовании разработанного в ИПФ квазиоптического синтезированного двухзеркального преобразователя [33] (рис.7). Эксперимент был проведен Н.И.Зайцевым и Ю.М.Гузновым. Резонатор гиротрона представлял собой отрезок волновода радиусом 22,3 мм и длиной однородного участка 50,7 мм. Ускоряющее напряжение после процесса включения составляло 135 кВ, ток пучка – 46.5 А.

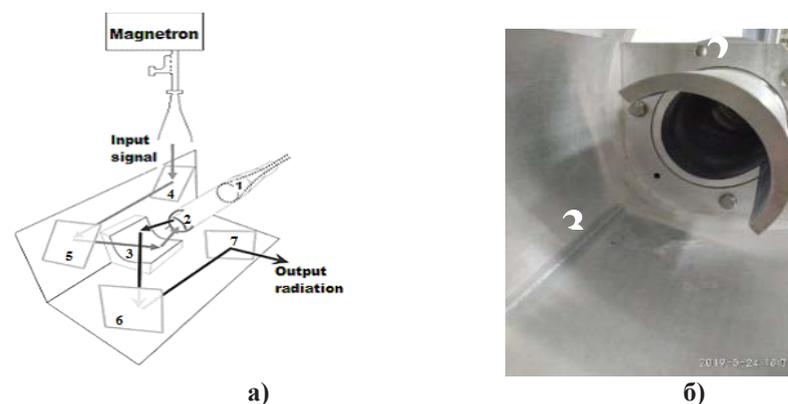


Рис. 7. Схема ввода – вывода излучения в гиротрон (а) и фотография преобразователя с квазипараболическим зеркалом (б); 1 – резонатор гиротрона, 2- козырьковый преобразователь, 3 - квазипараболическое зеркало, 4,5 – входные зеркала, 6,7 – выходные зеркала.

Численные расчеты проводились на основе уравнений многомодового гиротрона (3),(4) (Глава1, [1*-4*]). При моделировании учитывалось взаимодействие пяти мод: рабочей моды $TE_{7,3}$, ее боковых сателлитов, симметрично отстоящих по частоте $TE_{6,3}$ и $TE_{8,3}$ и двух мод встречного вращения: $TE_{-5,4}$ и $TE_{-4,4}$. В процессе включения и выключения напряжения могли возбуждаться паразитные моды $TE_{6,3}$, $TE_{8,3}$ и $TE_{-5,4}$, а на полке импульса напряжения и тока происходила генерация только рабочей моды. При расчетах значение пичч-фактора электронного пучка принималось равным 1.2.

При частотах входного сигнала магнетрона, достаточно близких к частоте автономной генерации гиротрона, и уровне мощности внешнего сигнала 25 кВт наблюдался захват частоты как в эксперименте, так и в расчетах

(рис.8). Ширина полосы захвата при максимальном уровне мощности внешнего сигнала составила в эксперименте и расчетах 12 МГц. Более сильная отстройка частоты магнетрона от частоты гиротрона приводила к выходу из режима захвата и появлению биений частоты и амплитуды поля излучения. В спектре излучения в эксперименте и расчетах появлялись боковые составляющие.

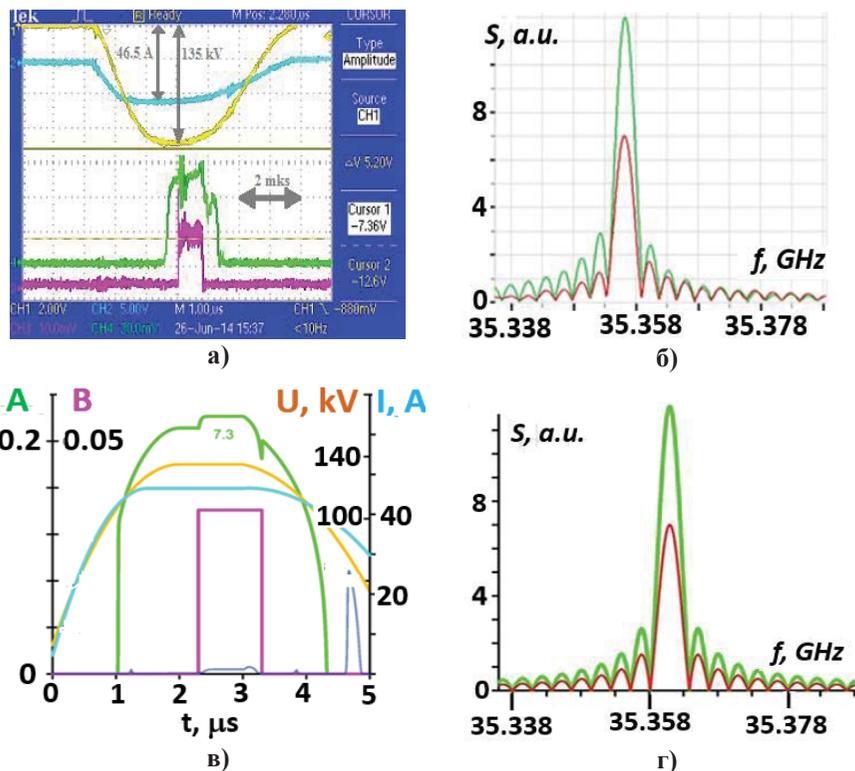


Рис. 8. Режим захвата частоты при мощности магнетрона 25 кВт. Осциллограммы (а,в) и спектры (б,г) магнетрона и гиротрона. Ток – голубая линия, напряжение – желтая, амплитуда гиротрона – зеленая, амплитуда магнетрона – сиреневая. Зеленые линии спектров – гиротрон, красные – магнетрон. Эксперимент – (а,б); расчёты – (в,г).

В Разделе 2.5 проведено сопоставление результатов численного моделирования с данными эксперимента по захвату частоты 170 ГГц/1 Мвт гиротрона сигналом гиротрона-драйвера мощностью 20 кВт [38]. Показано, что основные количественные характеристики режимов (увеличение мощности, расширение полосы генерации на рабочей моде в режиме захвата частоты, ширина полосы захвата) совпадают с результатами расчетов на основе более полных уравнений и с экспериментальными данными. В эксперименте

и расчетах наблюдалось увеличение мощности излучения на 11% , от 1.1 МВт в автономном режиме до 1.22 МВт при захвате частоты в области оптимальных (больших) циклотронных расстроек (то есть в области малых значений ведущего магнитного поля и тока ведущего соленоида) (рис.9). Также было продемонстрировано расширение полосы генерации на рабочей моде примерно в два раза; оно было относительно небольшим в области меньших значений ведущего магнитного поля и довольно значительным в области больших значений ведущего магнитного поля.

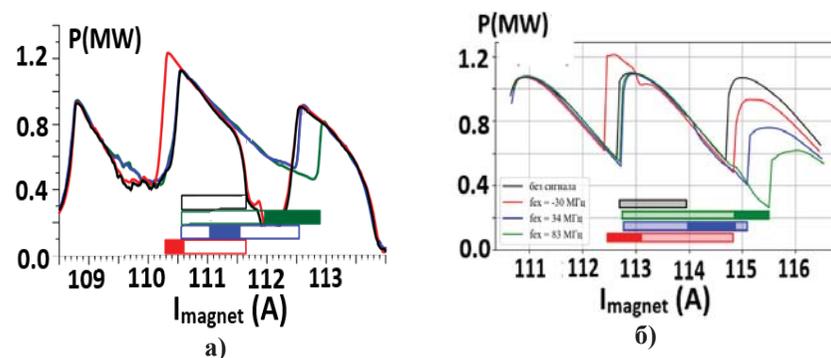


Рис. 9. Экспериментальные (а) и теоретические (б) зависимости мощности излучения от тока ведущего соленоида. Внизу указаны области одночастотной генерации, на них закрашены зоны захвата. Разные цвета соответствуют разным частотам внешнего сигнала; черный цвет – автономной генерации. Напряжение 100 кВ, сила тока 35 А

В Главе 3 теоретически исследованы режимы генерации и возможность захвата частоты многомодового гиротрона при воздействии внешнего сигнала со ступенчатой и синусоидальной модуляцией амплитуды или частоты, а также при воздействии двух монохроматических сигналов [15*-17*]. Эта задача представляет интерес для таких приложений, как диагностика плазмы, коллективное томсоновское рассеяние, ускорение ионов в поле биений частоты излучения [22], а также создание в перспективе комплекса когерентно излучающих гиротронов, частота которых захвачена и управляется гиротроном-драйвером. В частности, определение допустимых значений параметров модуляции внешнего сигнала, при которых возможен захват частоты гиротрона, позволяет выработать требования к разбросу параметров гиротрона-драйвера.

Исследование воздействия внешнего сигнала с гармонической модуляцией параметров проводилось несколько десятилетий назад для одномодовых генераторов типа Ван-дер-Поля с квадратичной нелинейностью [88,89]. Также рассматривалась (теоретически и экспериментально) аналогичная задача о воздействии на гиротрон отраженной волны с периодически меняющейся фазой запаздывания или коэффициента отражения при использовании в качестве отражателя колеблющейся мембраны [43,37*-39*]. Однако в перечис-