

УДК 537.87

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕГО СИГНАЛА НА РЕЖИМ ГЕНЕРАЦИИ ГИРОТРОНА МЕГАВАТТНОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

В. Л. Бакунин, Ю. М. Гузнов, Г. Г. Денисов, Н. И. Зайцев, С. А. Запезалов, А. Н. Куфтин, Ю. В. Новожилова, А. П. Фокин, А. В. Чирков, А. С. Шевченко*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Для гиротрона с мегаваттным уровнем мощности экспериментально исследован захват частоты излучения внешним сигналом. Внешний сигнал от магнетрона на частоте 35 ГГц поступал в рабочее пространство гиротрона через синтезированный двухзеркальный квазиоптический преобразователь, разработанный в ИПФ РАН. Измерены спектры излучения как в режиме захвата частоты, так и при биениях частоты. Построена область захвата на плоскости двух параметров: мощности и частоты внешнего сигнала. Сравнение экспериментальных данных и теоретических результатов показало их хорошее соответствие.

ВВЕДЕНИЕ

Стабилизация частоты излучения мощных гиротронов является важной проблемой для ряда практических приложений, в частности для создания комплекса когерентно излучающих мощных источников микроволнового диапазона. Одним из способов стабилизации частоты является захват частоты гиротрона внешним монохроматическим сигналом. До настоящего времени эксперименты по захвату частоты гиротрона внешним сигналом — излучением магнетрона — выполнялись для гиротронов с прямым вводом и выводом излучения и уровнем мощности излучения до десятков киловатт [1, 2]. Для вывода излучения в гиротронах мегаваттной мощности традиционно используются квазиоптические преобразователи [3], трансформирующие входную волну в моду со встречным направлением вращения полей относительно рабочей моды [4, 5]. После создания в ИПФ РАН синтезированного квазиоптического преобразователя [6], обеспечивающего ввод внешнего сигнала в резонатор гиротрона в виде рабочей моды (см. рис. 1), появилась возможность осуществить захват частоты гиротрона мегаваттного уровня мощности внешним сигналом [7, 8].

В данной работе проанализированы результаты эксперимента [7, 8], в котором исследовалось воздействие излучения магнетрона на режим работы гиротрона с мегаваттным уровнем мощности. Экспериментальные результаты подтверждены численными расчётами на основе уравнений, аналогичных используемым в работах [9–11] для описания многомодового гиротрона в приближении фиксированной продольной структуры поля. Продольное распределение поля соответствовало реальной «холодной» структуре поля в резонаторе, сценарии включения и выключения тока и напряжения также были близки к реальным.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Экспериментально исследовалось воздействие внешнего сигнала на гиротрон с рабочей модой $TE_{7,3}$. Резонатор гиротрона представлял собой отрезок волновода с радиусом 22,3 мм и длиной

* julia.novozhilova2009@yandex.ru

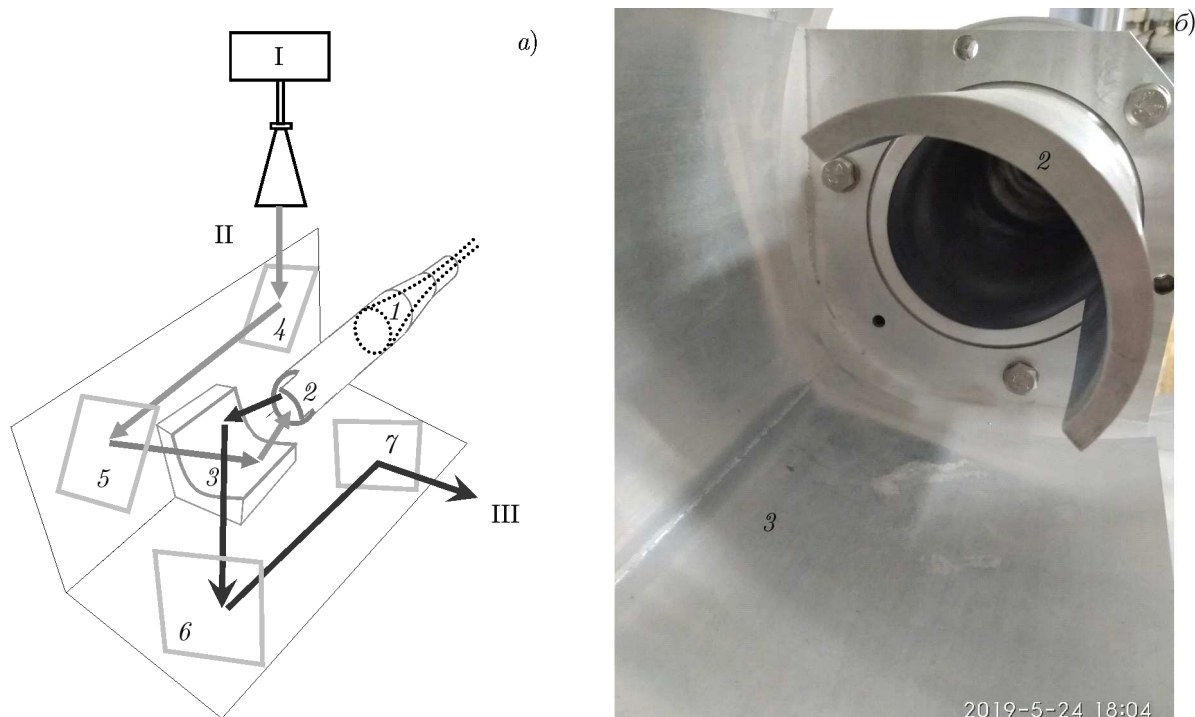


Рис. 1. Схема ввода–вывода излучения в гиротрон (а) и фотография преобразователя с квази-параболическим зеркалом (б): 1 — резонатор гиротрона, 2 — козырьковый преобразователь, 3 — квазипараболическое зеркало, 4 и 5 — входные зеркала, 6 и 7 — выходные зеркала; I — магнетрон, II — входной сигнал, III — выходное излучение



Рис. 2. Фотография электродинамической части экспериментальной установки: 1 — волноводный выходной тракт гиротрона, соединяющий резонатор и преобразователь, 2 — выходной рупор магнетрона, 3 — вывод излучения гиротрона в калориметрическую нагрузку

мы зеркал вводилось под заданным углом в квази-оптический преобразователь, где оно трансформировалось в рабочую моду $TE_{7,3}$ (см. рис. 1 и 2). Уровень мощности магнетрона измерялся

однородного участка 50,7 мм. Радиус трубчатого электронного пучка был равен 10 мм. Рабочая мода резонатора $TE_{7,3}$ имела одну продольную вариацию поля. Ведущее магнитное поле было равно $B_0 = 1,5 \pm 0,1$ Тл, ускоряющее напряжение после процесса включения составляло 135 кВ, ток пучка 46,5 А. Мощность гиротрона измерялась калориметром и в автономном режиме генерации составляла 900 кВт. Частоты входного и выходного сигнала определялись с помощью гетеродинного приёмника и последующего анализа спектра на промежуточной частоте. Измеренная в эксперименте частота свободной генерации гиротрона слегка варьировалась из-за нестабильности напряжения и вследствие нагрева резонатора гиротрона в пределах $f_g = 35,359 \div 35,363$ ГГц.

Сверхвысокочастотное излучение магнетрона на частоте f_m , близкой к частоте автономной генерации гиротрона, подавалось одномодовым волноводом к рупору, формирующему гауссов пучок. Затем это излучение посредством систе-

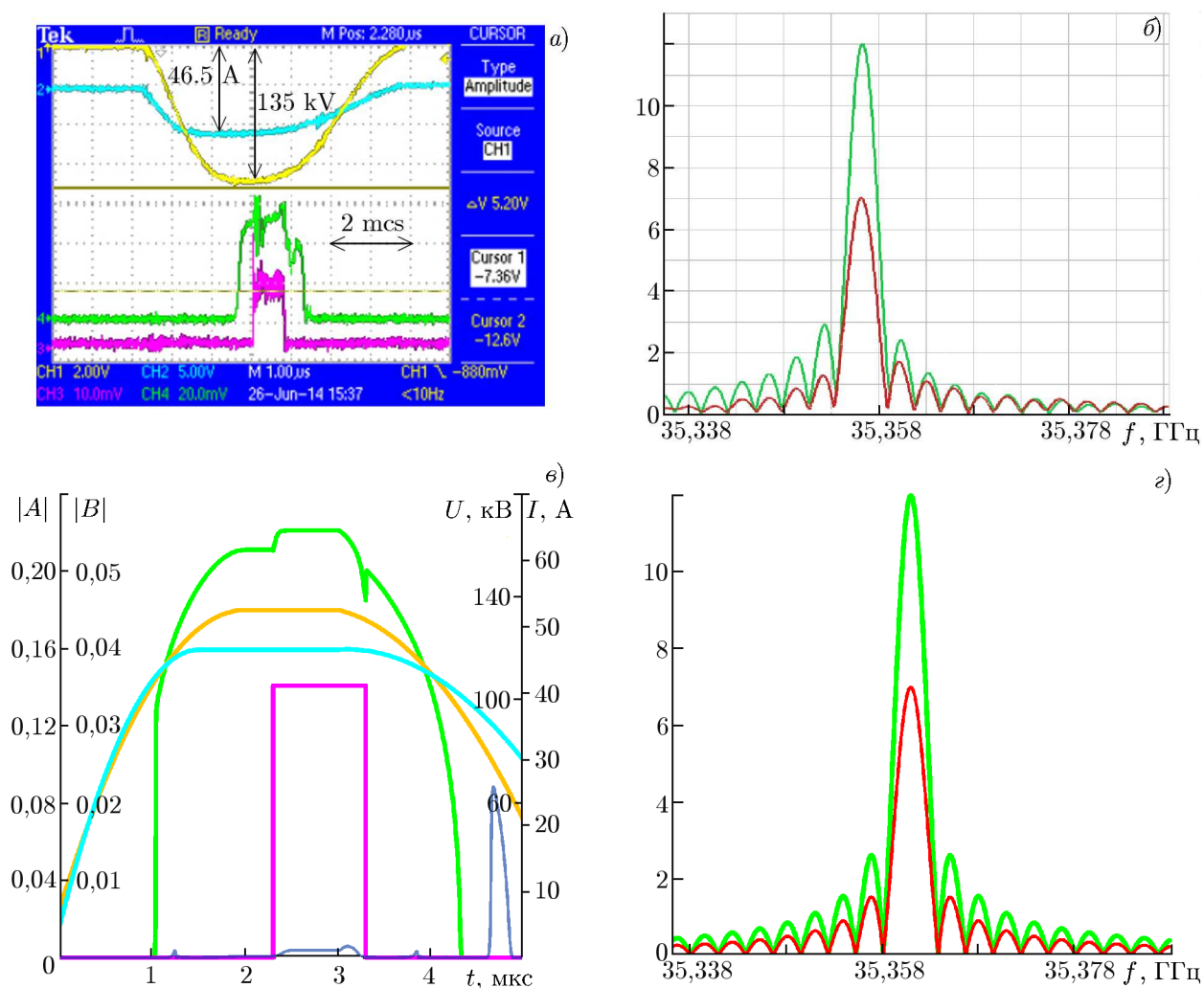


Рис. 3. Осциллограммы (а, в) и спектры (б, г) сигнала магнетрона и излучения гиротрона в случае захвата частоты при максимальной мощности магнетрона 25 кВт по экспериментальным данным (а, б) и численным расчётам (в, г). На экспериментальной осциллограмме а указаны значения тока и напряжения на горизонтальном участке импульса. На панелях б и г зелёным цветом показан спектр излучения гиротрона, красным — спектр сигнала магнетрона (в относительных единицах). На панели в зелёным и синим цветами даны модули поля рабочей моды $TE_{7,3}$ ($|A|$) и правого сателлита $TE_{8,3}$ соответственно, розовым — поле сигнала ($|B|$; все поля в безразмерных единицах), жёлтым — напряжение V , голубым — ток I

калориметром и без ослабления был равен 25 кВт, что составило 2,8% от мощности излучения автономного гиротрона. Мощность входного сигнала магнетрона могла быть ослаблена аттенуатром.

Численные расчёты проводились на основе уравнений многомодового гиротрона [9–11], записанных в приближении фиксированной продольной структуры поля. Такое приближение справедливо при достаточно высокой добротности резонатора гиротрона, когда время переходных процессов Q_s/ω_s для каждой из взаимодействующих мод много больше времени пролёта электронов через резонатор (s — номер моды, Q_s и ω_s — её добротность и действительная часть собственной частоты). Это условие выполнено, т. к. добротность мод резонатора примерно равна

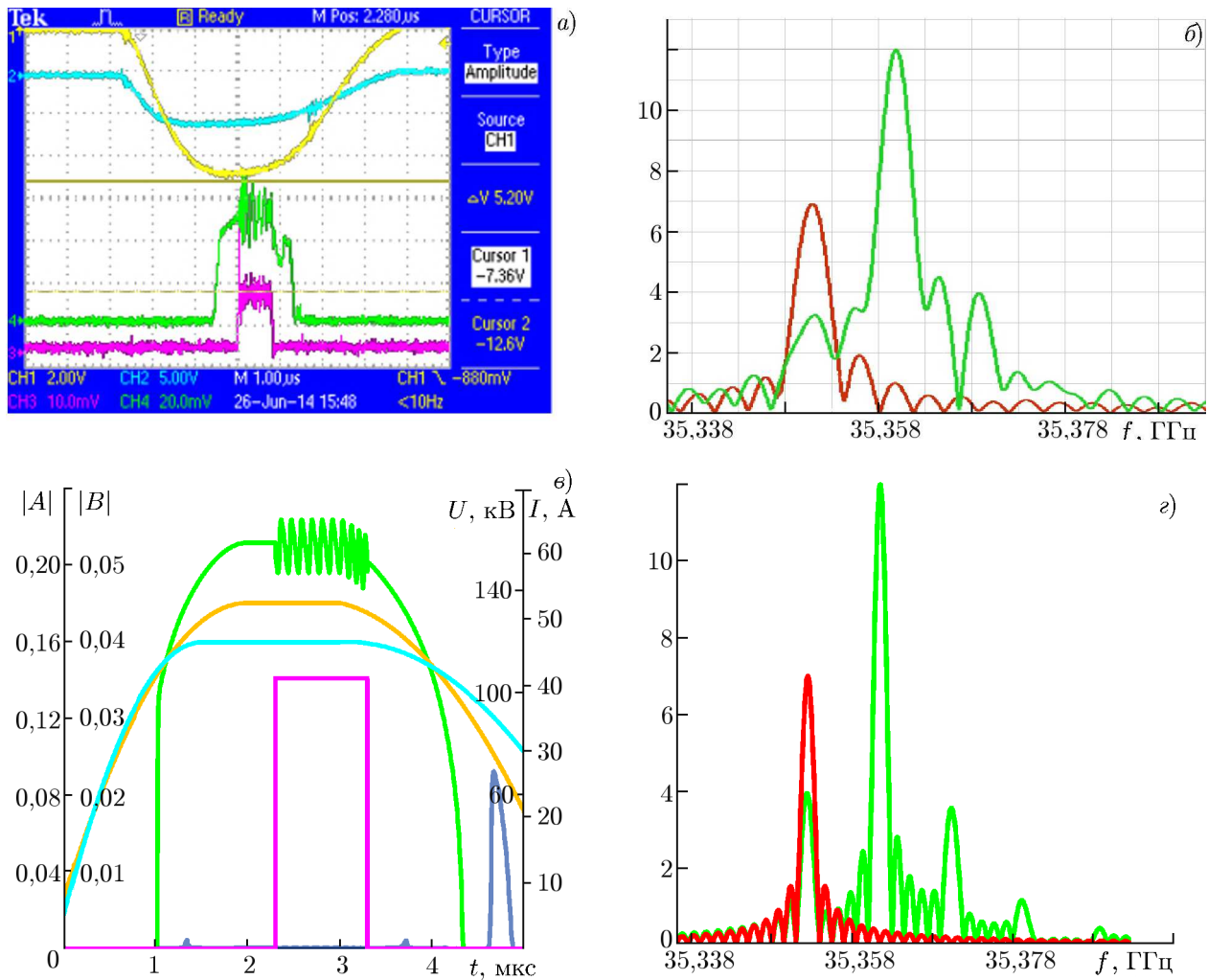


Рис. 4. Осциллограммы и спектры сигнала магнетрона и излучения гиротрона в отсутствие захвата частоты при разности частот магнетрона и гиротрона 9 МГц, мощности излучения магнетрона 25 кВт по экспериментальным данным (а, б) и численным расчётам (в, г). Обозначения такие же, как на рис. 3

$Q_s \approx 1000$, при этом время переходных процессов составляет около 5 нс, а время пролёта — около 0,3 нс. Входные параметры электронного пучка (ток, напряжение) в эксперименте и расчётах менялись за время порядка 1 мкс (см. осциллограммы на рис. 3а, 4а и 5а) — очень медленно по сравнению с временем пролёта электронов через пространство взаимодействия, так что на каждом шаге интегрирования по времени эти параметры можно считать постоянными.

При моделировании учитывалось взаимодействие пяти мод, лежащих в полосе циклотронного резонанса: рабочей моды $TE_{7,3}$, её боковых сателлитов — симметрично отстоящих по частоте мод $TE_{6,3}$ и $TE_{8,3}$ и двух мод встречного вращения $TE_{-5,4}$ и $TE_{-4,4}$. Взаимодействие с модами, расположенными вне полосы циклотронного резонанса, несущественно. Частота автономной генерации гиротрона была близка к её экспериментальному значению 35,364 ГГц. Действительная часть холодной частоты резонатора, соответствующей рабочей моде $TE_{7,3}$, составляла 35,359 ГГц. Магнитное поле в расчётах принималось равным 1,485 Тл, что лежит в пределах погрешности экспериментального значения. При таком магнитном поле в процессе включения и выключения напряжения могли возбуждаться паразитные моды $TE_{6,3}$, $TE_{8,3}$ и $TE_{-5,4}$, а на полке импуль-

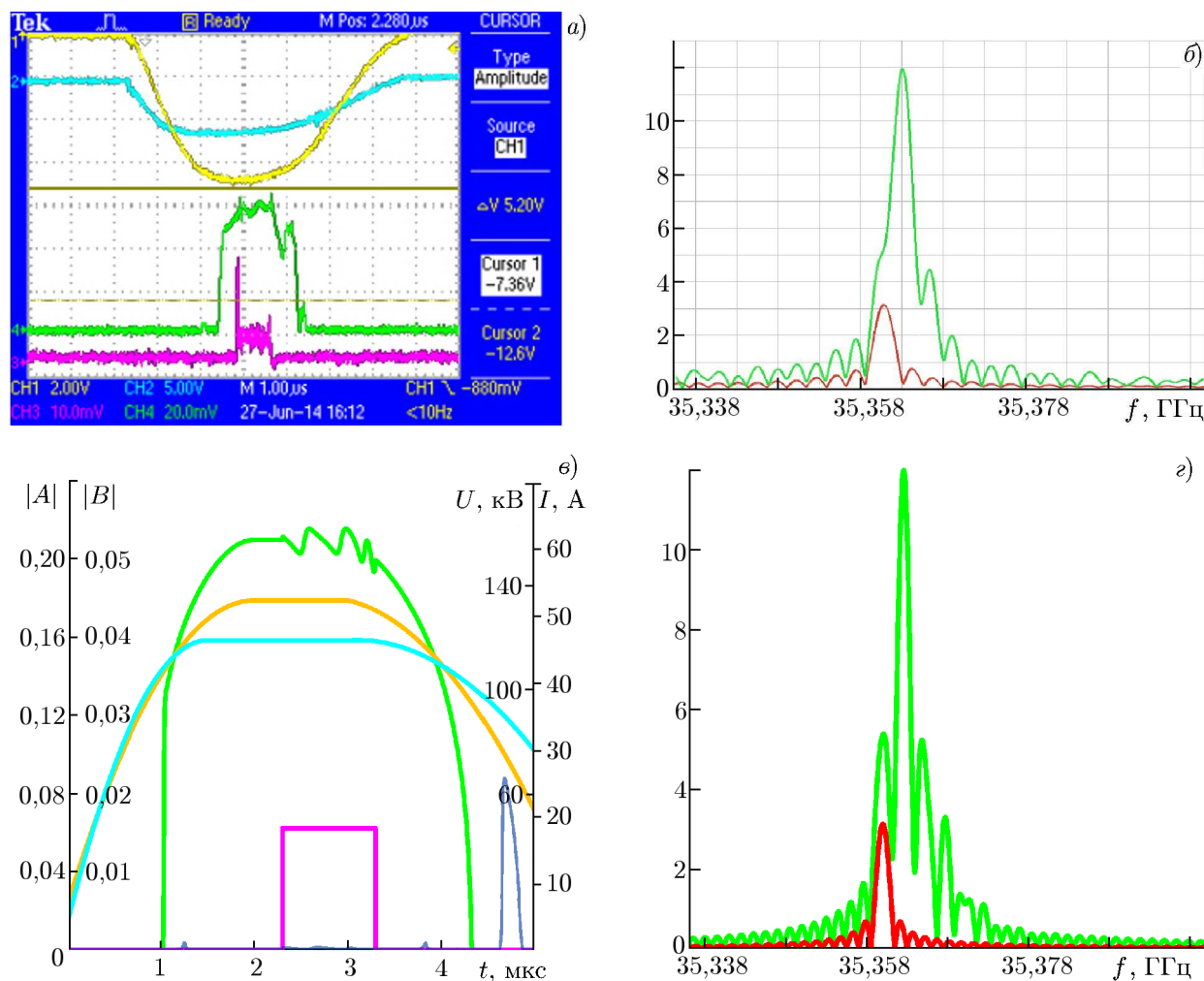


Рис. 5. Осциллограммы и спектры сигнала магнетрона и излучения гиротрона в случае малых биений частоты при уровне мощности излучения магнетрона 5 кВт, разности частот гиротрона и магнетрона 3 МГц по экспериментальным данным (а, б) и численным расчётам (в, г). Обозначения такие же, как на рис. 3

са напряжения и тока происходила генерация только рабочей моды. При расчётах питч-фактор электронного пучка принимался равным 1,2. Расчётная безразмерная расстройка циклотронного резонанса между частотой автономной генерации и гирочастотой составила $\Delta = 0,63$. В результате аппроксимации осциллограмм напряжения и тока полиномами были получены зависимости, показанные на рис. 3в, 4в и 5в. Как и в эксперименте, включение внешнего сигнала при моделировании происходило в момент выхода напряжения и тока на их постоянные значения, длительность импульса сигнала была равна длине полки напряжения (см. рис. 3–5).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

При частотах входного сигнала магнетрона f_m , достаточно близких к частоте автономной генерации гиротрона f_g , и уровне мощности внешнего сигнала 25 кВт наблюдался захват частоты (см. рис. 3а и б). Измеренные гетеродинным методом с точностью до 1 МГц частоты автономной генерации гиротрона и магнетрона были равны $f_g = 35,359$ ГГц, $f_m = 35,356$ ГГц соответственно.

В расчётах также наблюдался захват частоты (рис. 3в и г). Расчётные значения частот составляли $f_m = 35,361$ ГГц, $f_g = 35,364$ ГГц и также, как в эксперименте, отличались на 3 МГц. В расчётных осциллограммах на рис. 3в и последующих рисунках видно возбуждение паразитной моды $TE_{8,3}$ на заднем фронте импульса напряжения.

При таком же уровне мощности сигнала магнетрона 25 кВт снижение его частоты на 5 МГц приводило к выходу из режима захвата и появлению биений частоты и амплитуды поля излучения (см. рис. 4а и в). Измеренная автономная частота при этом составила $f_g = 35,36$ ГГц. В спектре излучения появлялись боковые составляющие, отстоящие от центральной компоненты на 9 МГц как в эксперименте, так и в расчётах (см. рис. 4б и г). Частота центральной компоненты спектра излучения была близка к частоте автономной генерации, частота одной из боковых компонент совпадала с частотой магнетрона. Расчётный спектр излучения был почти симметричным, а в эксперименте ширина и интенсивность правой и левой боковых компонент спектра излучения были различными. Несимметрия спектра излучения в эксперименте объясняется нестабильностью источника питания, приводящей к нестабильности автономной частоты гиротрона. При воздействии внешнего сигнала как в эксперименте, так и в расчётах даже в отсутствие захвата (в режиме биений) центральная компонента спектра излучения смещалась в сторону частоты магнетрона на $1 \div 2$ МГц по сравнению со спектром автономной генерации. Это обусловлено увеличением амплитуды поля в резонаторе при воздействии внешнего сигнала по сравнению с автономным режимом и соответствующим изменением как активной, так и реактивной составляющей высокочастотного тока, приводящим к сдвигу частоты.

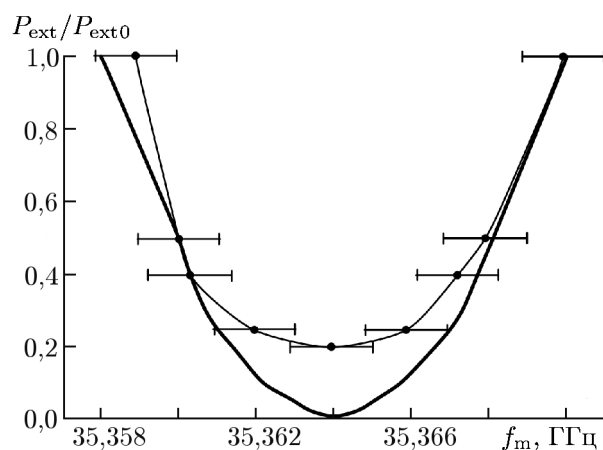


Рис. 6. Граница зоны захвата на плоскости двух параметров: уровня мощности и частоты магнетрона. Здесь P_{ext} — мощность излучения магнетрона, P_{ext0} — её максимальное значение. Тонкая линия соответствует эксперименту, толстая — расчётам. На экспериментальной кривой горизонтальными отрезками отмечены границы погрешности измерения частоты магнетрона

на полке импульса, что, как отмечалось выше, приводило к нестабильности автономной частоты гиротрона, её флуктуациям в пределах нескольких мегагерц и выходу из режима захвата. В расчётах нестабильность напряжения не учитывалась, поэтому экспериментальные данные и расчёты немного отличались, особенно при малых значениях мощности сигнала.

Во всех режимах в расчётах (см. рис. 3в, 4в и 5в) на финальном участке импульса напряжения после исчезновения рабочей моды $TE_{7,3}$ возбуждался правый сателлит $TE_{8,3}$. В эксперименте

При ослаблении уровня внешнего сигнала ширина полосы захвата уменьшалась. На рис. 5а и б приведены экспериментальные осциллограммы и спектры для случая, когда мощность излучения магнетрона была ослаблена на 7 дБ и составляла 5 кВт. При этом частота магнетрона $f_m = 35,361$ ГГц была близка к частоте автономных колебаний (измеренная частота в автономном режиме составила $f_g = 35,363$ ГГц) и происходили малые биения частоты и амплитуды. Центральная частота в спектре излучения отличалась от частоты магнетрона на 2 МГц, боковые составляющие спектра излучения были выражены слабо. В расчётах подобные спектры (со сдвигом центральных частот гиротрона и магнетрона на 2 МГц) наблюдались, если частота магнетрона была смещена относительно частоты гиротрона на 4 МГц (см. рис. 5в и г), а при расстройке частот на 2 МГц происходил захват частоты. Такое отличие расчётных и экспериментальных данных было связано с нестабильностью напря-

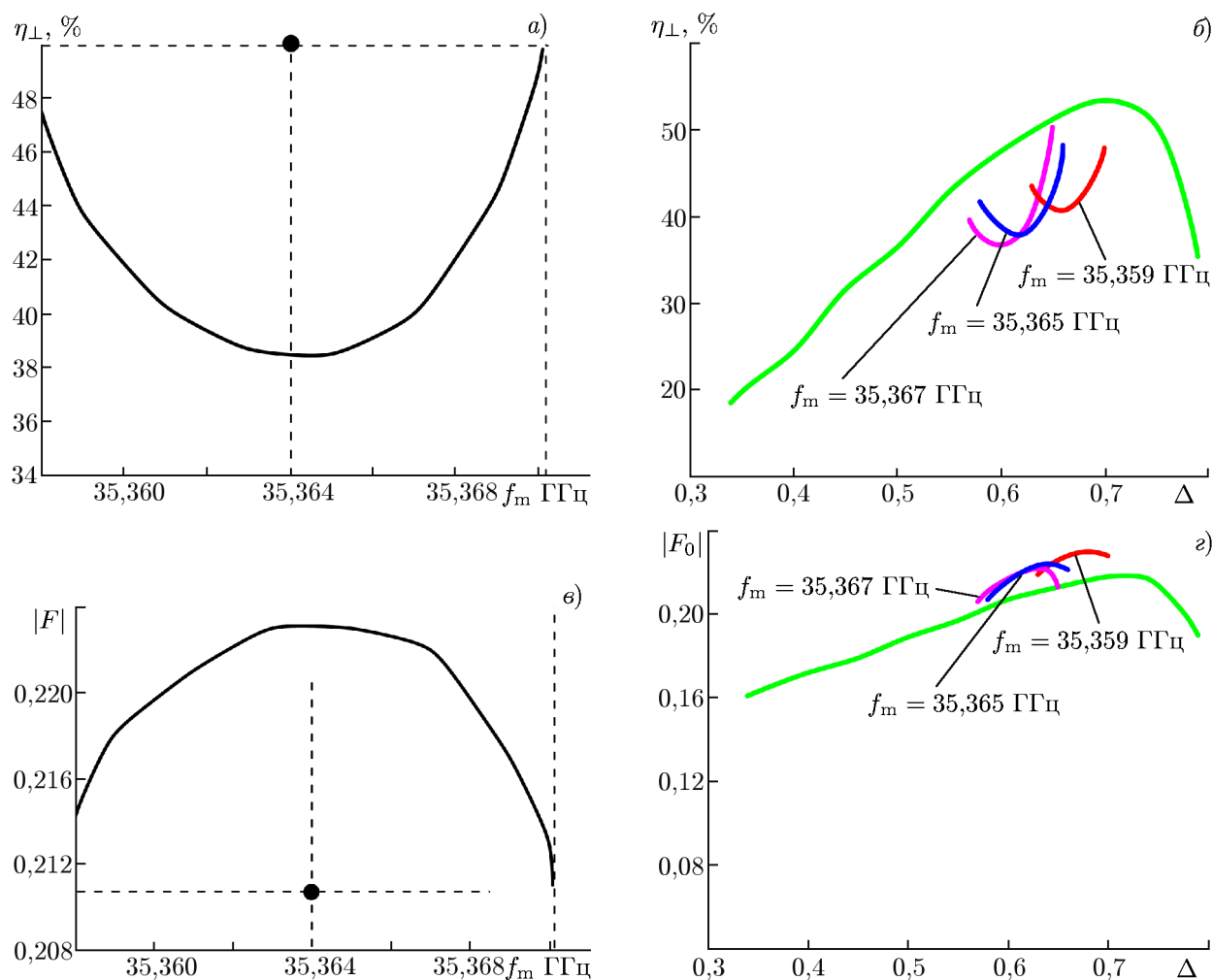


Рис. 7. Расчётные зависимости орбитального КПД (а, б) и амплитуды поля (в, г) в полосе захвата от частоты внешнего сигнала при $\Delta = 0,63$ (а, в) и от Δ при разных частотах внешнего сигнала (б, г); $I = 46,5$ А, $U = 135$ кВ, мощность магнетрона 25 кВт. Точки на панелях а и в соответствуют автономному режиму. На панелях б и г зелёные линии отвечают автономной генерации, остальные линии — разным частотам внешнего сигнала

возбуждение спутника не наблюдалось из-за его малой амплитуды и использования выходного преобразователя рабочей моды.

Были найдены экспериментально и теоретически границы области захвата на плоскости двух параметров — мощности и частоты магнетрона. Границы представляют собой кривые, близкие к параболам (см. рис. 6). Вершина параболы, полученная на основании расчётов, в согласии с классическими представлениями [12] соответствует частоте внешнего сигнала, равной частоте автономной генерации и нулевой мощности сигнала. В эксперименте при уровнях мощности магнетрона меньше 5 кВт захват не наблюдался.

3. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО СИГНАЛА НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ ЗАХВАТЕ И СЦЕНАРИИ ВЫХОДА ИЗ ЗОН ЗАХВАТА: РАСЧЁТЫ

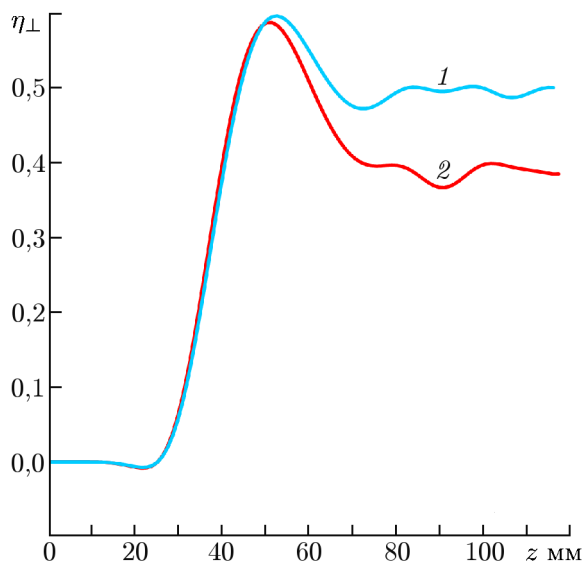


Рис. 8. Расчётная зависимость орбитального КПД $\eta_{\perp}$ в стационарном режиме от продольной координаты z ($z = 0$ во входном сечении резонатора гиротрона) при $\Delta = 0,63$ в автономном гиротроне (кривая 1) и в гиротроне, частота которого захвачена внешним сигналом с относительной мощностью 2,8 % и частотой $f_m = 35,365$ ГГц (кривая 2) в режиме генерации в отсутствие внешнего сигнала и при захвате частоты. На последней трети длины пространства взаимодействия происходит перегруппировка электронного пучка, приводящая к падению орбитального КПД в отсутствие внешнего сигнала с 60 до 50 %, при захвате частоты внешним сигналом — с 60 до 40 %.

Следует отметить, что зоны захвата по расстройке циклотронного резонанса Δ при захвате сужаются (см. рис. 7б и г). Выход из зон захвата при возрастании расстройки циклотронного резонанса Δ сопровождается биениями частоты рабочей моды $TE_{7,3}$. По мере увеличения величины Δ частота биений возрастает, после выхода из зоны автономной генерации (при $\Delta > 0,79$) возбуждается левый спутник $TE_{6,3}$, в отличие от одномодового гиротрона, где при возрастании расстройки Δ может происходить переход в регенеративный режим усиления с малым КПД [16]. Выход из зоны захвата при уменьшении расстройки Δ также сопровождается биениями частоты рабочей моды, при дальнейшем уменьшении величины Δ и выходе из зоны автономной генерации ($\Delta < 0,35$) возбуждается правый спутник $TE_{8,3}$. Аналогичные переходы к биениям и возбуждению соседних мод наблюдаются при выходе из зоны захвата и в мощном гиротроне на частоте 170 ГГц [10, 11].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента продемонстрировали возможность захвата частоты и фазы гиротрона мегаваттного уровня мощности, работающего на частоте 35 ГГц, слабым внешним сигналом магнетрона (0,5÷2,8 % от мощности автономного гиротрона). Построены экспериментальные и

При захвате частоты мощного многомодового гиротрона возможно продвижение в область более оптимальных (для достижения высокого коэффициента полезного действия (КПД)) расстроек циклотронного резонанса Δ [9–11]. Однако для гиротрона, исследуемого в данной работе, КПД снижается по сравнению с режимом автономной генерации (см. рис. 7а и б), хотя величина поля рабочей моды в резонаторе гиротрона при захвате его частоты возрастает по сравнению с автономным режимом в согласии с классическими представлениями [12, 13] (см. рис. 7в и г). Подобное снижение КПД при захвате частоты внешним сигналом описывается в работе [14]. Снижение КПД можно объяснить тем, что при заданных параметрах гиротрона значения амплитуды поля и длины резонатора превышают оптимальные (с точки зрения достижения высокого КПД) величины [15]. В этом случае возрастание амплитуды поля при вводе внешнего сигнала приводит к уменьшению КПД, что подтверждается приведённым на рис. 8 продольным распределением орбитального КПД в стационарном режиме генерации в отсутствие внешнего сигнала и при захвате частоты.

расчётные осциллограммы и спектры излучения и сигнала при захвате частоты и в режиме биеений частоты. Найдена область захвата на плоскости двух параметров — мощности и частоты магнетрона. Результаты эксперимента и численного моделирования находятся в хорошем соответствии. Согласно результатам расчётов, КПД при захвате частоты внешним сигналом снижен по сравнению с КПД в режиме автономной генерации, т. к. длина резонатора гиротрона была выше оптимальной.

Авторы благодарны А. С. Седову и Н. М. Рыскину за плодотворные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19–79–30071).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Read M. E., Seeley R., Manheimer W. M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. V. 13, No. 6. P. 398.
2. Guo H., Hoppe D. J., Rodgers J., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1995. V. 23, No. 5. P. 822.
3. Власов С. Н., Орлова И. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17, № 1. С. 148.
4. Dumbrajs O. // J. Infrared Millim. TeraHz. Waves. 2010. V. 31. No. 8. P. 892.
5. Новожилова Ю. В., Рыскин Н. М., Чумакова М. М. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 6. С. 136.
6. Chirkov A. V., Denisov G. G., Kuftin A. N. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106, No. 26. Art. no. 263501.
7. Бакунин В. Л., Гузнов Ю. М., Денисов Г. Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, вып. 11. С. 38.
8. Novozhilova Yu. V., Bakunin V. L., Chirkov A. V., et al. // EPJ Web Conf. 2017. V. 149. Art. no. 04021.
9. Моисеев М. А., Нусинович Г. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17, № 11. С. 1709.
10. Бакунин В. Л., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В., Фокин А. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8–9. С. 709.
11. Бакунин В. Л., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 12. С. 999.
12. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 с.
13. Ергаков В. С., Моисеев М. А., Хижняк В. И. // Радиотехника и электроника. 1978. № 12. С. 2591.
14. Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Zotova I. V. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. Art. no. 033101.
15. Нусинович Г. С., Эрм Р. Э. // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1972. № 8. С. 55.
16. Yakunina K. A., Kuznetsov A. P., Ryskin N. M. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22, No. 11. Art. no. 113107.

Поступила в редакцию 24 июня 2019 г.; принята в печать 30 августа 2019 г.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EXTERNAL-SIGNAL INFLUENCE ON THE OSCILLATION REGIME OF A MEGAWATT GYROTRON

*V. L. Bakunin, Yu. M. Guznov, G. G. Denisov, N. I. Zaitsev, S. A. Zapevalov, A. N. Kuftin,
Yu. V. Novozhilova, A. P. Fokin, A. V. Chirkov, and A. S. Shevchenko*

The radiation-frequency locking by an external signal is experimentally studied for a megawatt gyrotron. An external signal from a magnetron is applied to the operation space of the gyrotron at a frequency of 35 GHz via a synthesized two-mirror quasioptical converter developed at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. The radiation spectra are measured for both the frequency locking regime and the frequency beats. The locking region is constructed on the plane of two parameters, namely, the external-signal power and frequency. The experimental and theoretical results are compared to show a good agreement.