

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

Кафедра нелинейной физики

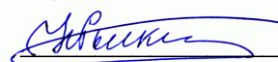
**ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ ГИРОТРОНА ВНЕШНИМ
ГАРМОНИЧЕСКИМ СИГНАЛОМ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 2 курса 214 группы
направления 03.03.01 «Прикладные математика и физика»
Факультета нелинейных процессов
Григорьевой Наталии Вадимовны

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор



Рыскин Н.М.

Зав. кафедрой нелинейной физики,

к.ф.-м.н., доцент



Бегинин Е.Н.

Саратов 2020 г.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных проблем СВЧ электроники является освоение коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазона. Одним из мощных источников ТГц излучения являются мазеры на циклотронном резонансе — гиротроны [1-5]. Одной из важных областей применения гиротронов является электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) [3], например, в рамках проекта международного термоядерного реактора ITER. Для этого проекта в ряде стран, включая Россию, были разработаны гиротроны, работающие на частоте 170 ГГц в непрерывном режиме генерации с выходной мощностью порядка одного мегаватта. Для следующего за ITER проекта демонстрационной термоядерной электростанции DEMO с более высокой плотностью плазмы подразумевается использование гиротронов со значительно большей частотой 230-250 ГГц и мощностью 1.5-2.0 МВт [6,7]. Следует отметить, что в установках УТС используются комплексы из большого числа гиротронов, поэтому обеспечение их когерентной работы является крайне важным фактором. Поэтому в последние годы проблема синхронизации гиротрона внешним сигналом привлекла большое внимание [8-13].

Следует отметить, что максимальный КПД в гиротроне, как правило, достигается в режиме жесткого возбуждения [1]. В работе [14] была разработана теория синхронизации обобщенной модели генератора с жестким возбуждением и проведено сопоставление с численным моделированием для одномодовой теории гиротрона с фиксированной гауссовой структурой высокочастотного (ВЧ) поля. Однако остались неизученными многие важные с практической точки зрения вопросы, например, как внешний сигнал влияет на выходную мощность и КПД генератора, при каких условиях достигается максимальная ширина полосы синхронизации и т.д.

Воздействие внешнего сигнала позволяет не только стабилизировать частоту и фазу рабочей моды, но и помогает обеспечить подавление паразитных

мод. Наконец, еще одно возможное применение внешнего воздействия связано с подавлением возбуждения паразитных мод на фронте импульса тока и напряжения в процессе установления колебаний. Поскольку, как уже отмечалось, в мощном гиротроне рабочая мода, как правило, находится в режиме жесткого возбуждения, выброс тока и(или) напряжения на переднем фронте импульса может вызвать срыв генерации рабочей моды и, соответственно, возбуждение паразитной моды, для которой выполняются условия мягкого возбуждения [15, 16]. Ожидается, что воздействие внешним сигналом в ходе переходного процесса позволит стабилизировать колебания рабочей моды.

В связи с вышесказанным, изучение особенностей синхронизации многомодовых моделей гиротрона внешним сигналом представляется актуальной задачей.

Целью данной работы является исследование влияния внешнего сигнала на динамику гиротрона. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- на основе модифицированной квазилинейной модели провести бифуркационный анализ одномодовой модели гиротрона под действием внешнего сигнала и выявить основные сценарии переходов в синхронный режим;
- исследовать зоны устойчивой одномодовой генерации в многомодовой модели гиротрона и рассмотреть возможность подавления паразитных мод внешним сигналом;
- изучить возможности подавления паразитных мод в процессе установления колебаний при выбросе импульса на фронте напряжения.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- Впервые на основе модифицированной квазилинейной модели гиротрона с гауссовой структурой ВЧ поля построена детальная картина синхронизации гиротрона в режиме жесткого возбуждения внешним сигналом.

- Для трехмодовой модели гиротрона с гауссовой структурой ВЧ поля при плотности спектра мод, соответствующей гиротрону с рабочей модой $TE_{28,12}$, исследовано подавление паразитных мод внешним сигналом и изучена возможность повышения КПД и выходной мощности.
- Для трехмодовой модели мощного гиротрона диапазона 250 ГГц с рабочей модой $TE_{19,8}$ продемонстрирована возможность подавления внешним сигналом паразитных мод, возбуждающихся на фронте импульса при скачке ускоряющего напряжения.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные в ней результаты могут быть использованы для повышения мощности и КПД, повышения стабильности частоты генерации и улучшения других характеристик гиротронов, используемых в различных приложениях.

Результаты, полученные в ходе выполнения выпускной квалификационной работы, частично использовались при выполнении гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00307) и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-02-00839.

Результаты докладывались на XIII и XIV Всероссийских научных конференциях молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2018 и 2019), на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018» (Саратов, 2018 г.), на школе-конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых» 2018 и 2019 г.г., на 7-м Международном семинаре по инфракрасным технологиям IW-FIRT 2019 (Фукуи, Япония, 2019), на Школе для молодых ученых «Актуальные проблемы мощной вакуумной электроники СВЧ: источники и приложения» (Нижний Новгород, 2019 г.), на 44-й Международной конференции по инфракрасным, миллиметровым и терагерцевым волнам IRMMW-THz 2019 (Париж, Франция, 2019), на XII международной школе-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов,

2019 г.), XIX научной школе «Нелинейные волны–2020» (Нижний Новгород, 2020 г.). Результаты были опубликованы в работах [18-25].

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении описывается актуальность работы, основные сферы применения гиротрона, сформулированы цель, задачи и научная новизна работы.

Глава 1 посвящена описанию математической модели гиротрона на основе теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля и квазилинейной теории. В разделе 1.1 кратко описаны устройство, принцип действия гиротрона и механизм взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полем. В разделе 1.2 приведены основные уравнения теории многомодового гиротрона с фиксированной структурой ВЧ поля [1, 11]. В разделе 1.3 описана так называемая модифицированная квазилинейная теория гиротрона для случая, когда учитывается взаимодействие пучка всего лишь с одной (рабочей) модой [17]. Уравнение возбуждения гиротрона можно записать в виде

$$\frac{dA}{d\tau} + A = I_0 \Phi(|A|^2) A + 2f e^{i\Omega\tau}, \quad (1)$$

где A — безразмерная комплексная амплитуда, I_0 — безразмерный параметр, имеющий смысл нормированного тока, $\Phi = \Phi' + i\Phi''$ — комплексная электронная восприимчивость, f — амплитуда внешнего сигнала, а Ω — безразмерная отстройка частоты внешнего воздействия от собственной частоты, τ — безразмерное время. В рамках модифицированной квазилинейной теории подбираются аналитические аппроксимации активной и реактивной восприимчивости в виде рациональных функций [17]

$$\Phi'(|A|^2) = \frac{\alpha' + \beta'|A|^2 + \gamma'|A|^4}{\delta' + \sigma'|A|^2 + \varepsilon'|A|^4}, \quad \Phi''(|A|^2) = \frac{\alpha'' + \beta''|A|^2 + \gamma''|A|^4}{\delta'' + \sigma''|A|^2 + \varepsilon''|A|^4}. \quad (2)$$

В главе 2 обсуждается синхронизация модифицированной квазилинейной модели в случае мягкого и жесткого возбуждения. В разделе 2.1 получены

уравнения резонансных кривых (1), приведены условия устойчивости неподвижных точек системы.

В разделах 2.2 и 2.3 рассматривается синхронизация гиротрона в случае мягкого и жесткого возбуждения соответственно. Построены резонансные кривые и языки синхронизации для различных значений нормированного тока I_0 . Также построены зависимости КПД от частоты внешнего сигнала и показано, что для каждого значения тока I_0 имеется оптимальное значение амплитуды внешнего воздействия f , при котором в определенной полосе частот КПД близок к максимально возможному.

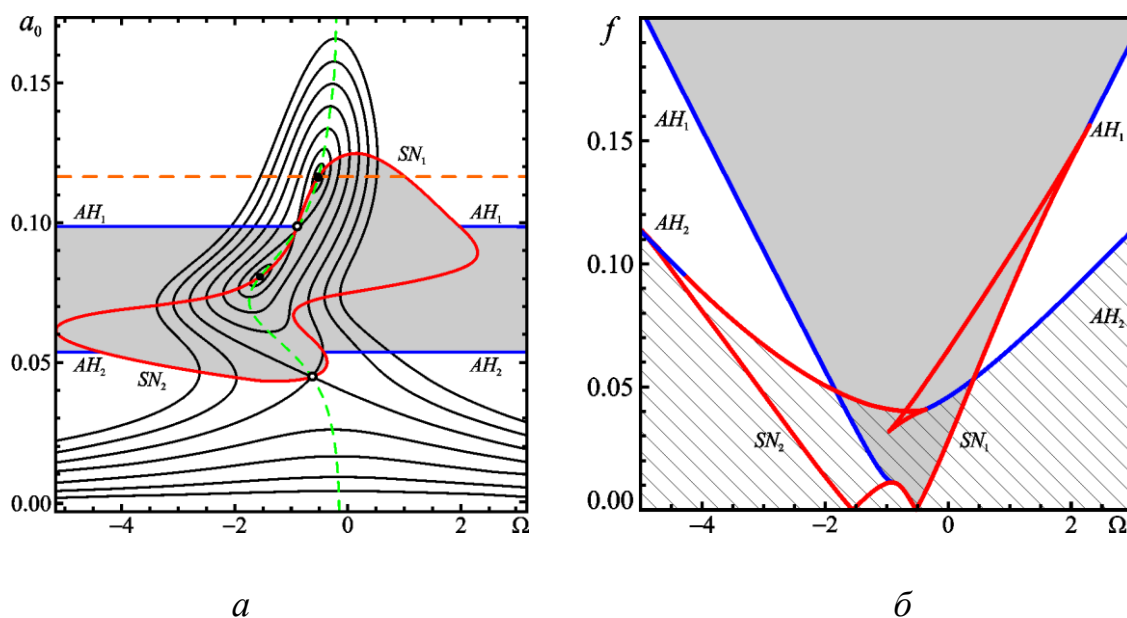


Рис. 1. Резонансные кривые (а), языки синхронизации (б) при $I_0 = 0.04$ в случае жесткого возбуждения ($\mu = 15$, $\Delta_H = 0.5$).

На рис. 1 приведены резонансные кривые и языки синхронизации в случае жесткого возбуждения. Видно, что фактически имеются два перекрывающихся языка синхронизации. Однако лишь один из них, ограниченный линиями SN_1 и AH_1 , в действительности задает границы область синхронизации (на рис. 1(б) эта область закрашена серым). Он соответствует границе верхней

устойчивой области на рис. 1(а). Второй язык ограничивает сверху область вынужденных колебаний (на рис. 1(б) эта область заштрихована), он соответствует границе нижней устойчивой области на рис. 1(а).

В разделе 2.4 рассматриваются особенности динамики гиротрона, когда ток находится ниже порога самовозбуждения, однако при воздействии внешнего сигнала возможно возбуждение колебаний, амплитуда которых почти так же велика, как и в режиме жесткого возбуждения. Следуя работе [14], будем называть такой режим режимом регенеративного усиления. В этом случае КПД достигает максимума при достаточно малой мощности входного сигнала, отношение входной мощности к выходной можно оценить как $P_{in}/P_{out} \approx (f/a_{\max})^2$, что составляет менее 2%. Проведено сравнение результатов, полученных для модифицированной квазилинейной модели, с расчетами по уравнениям нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой поля. Обнаружено хорошее соответствие между ними. В частности, значения КПД достаточно близки, отличие составляет не более 5%.

В главе 3 рассматривается численное моделирование синхронизации многомодового гиротрона с фиксированной гауссовой структурой ВЧ поля в режиме жесткого возбуждения. В разделе 3.1 проведено исследование влияния внешнего сигнала на одномодовую модель. Различные режимы системы рассмотрены на плоскости параметров «расстройка циклотронного резонанса Δ_H — безразмерный параметр тока I_0 ». На рис. 2 сплошной зеленой линией показана граница зоны мягкого возбуждения, штриховая зеленая линия ограничивает область жесткого возбуждения. Границы области синхронизации показаны на рис. 2 кружками и сплошными синими линиями. Слева от области синхронизации находится область биений. При движении по плоскости параметров слева направо биения возникают мягко, в результате бифуркации Андронова–Хопфа. Правая граница области синхронизации расположена правее границы жесткого возбуждения для автономного гиротрона. Следовательно, между этими границами наблюдается режим регенеративного усиления. При

пересечении правой границы области синхронизации происходит срыв в режим вынужденных колебаний с малой амплитудой.

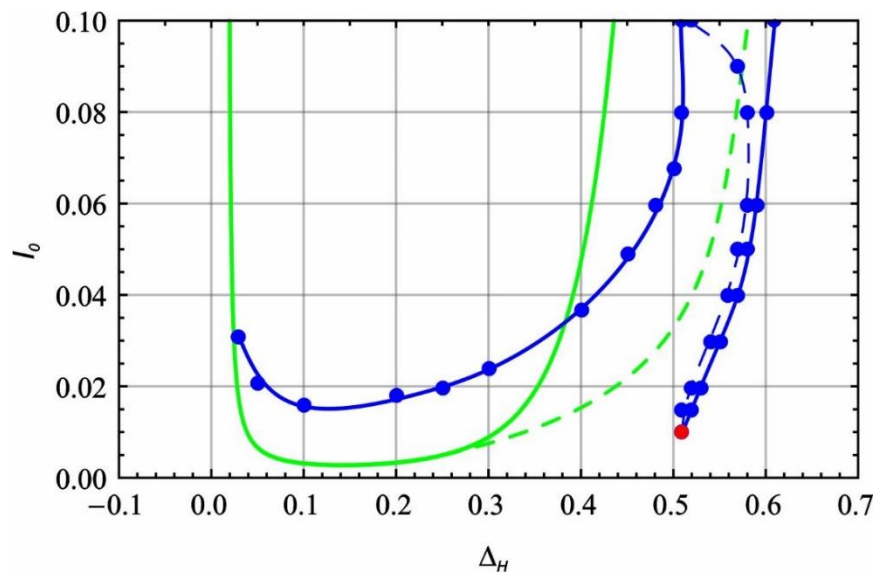


Рис. 2. Зона генерации автономного гиротрона (зеленые линии) при $\mu=15$ и область синхронизации для неавтономного гиротрона при $f=0.05$, $\Omega=-0.45\pi$.

В разделе 3.2 приведено исследование подавления паразитных мод внешним сигналом в гиротроне диапазона 170 ГГц. Моделирование проводилось на примере трехмодовой модели с эквидистантным спектром мод. Зоны генерации построены на рис. 3. Точка максимального КПД отмечена красным кружком. Она находится в зоне жесткого возбуждения рабочей моды ($s=0$) и мягкого для высокочастотного сателлита ($s=1$). Область устойчивости рабочей моды показана серым цветом. Как видно из рис. 3, в точке максимального КПД одномодовый режим неустойчив. Механизмом потери устойчивости является распадная (параметрическая) неустойчивость, приводящая к возбуждению мод-сателлитов ($s=\pm 1$).

При воздействии внешнего сигнала со следующими параметрами: амплитуда $f=0.05$, частота $\Omega=-0.45\pi$ границы области синхронизации для рабочей моды показаны черными кружками. Границы области синхронизации для одномодовой модели показаны фиолетовым пунктиром. Левая граница практически совпадает с границей области биений для автономной модели.

Правая граница состоит из двух участков. Нижний совпадает с соответствующей границей для одномодовой модели, т.е. на этом участке происходит срыв колебаний основной моды. Верхний участок соответствует развитию распад-ной неустойчивости.

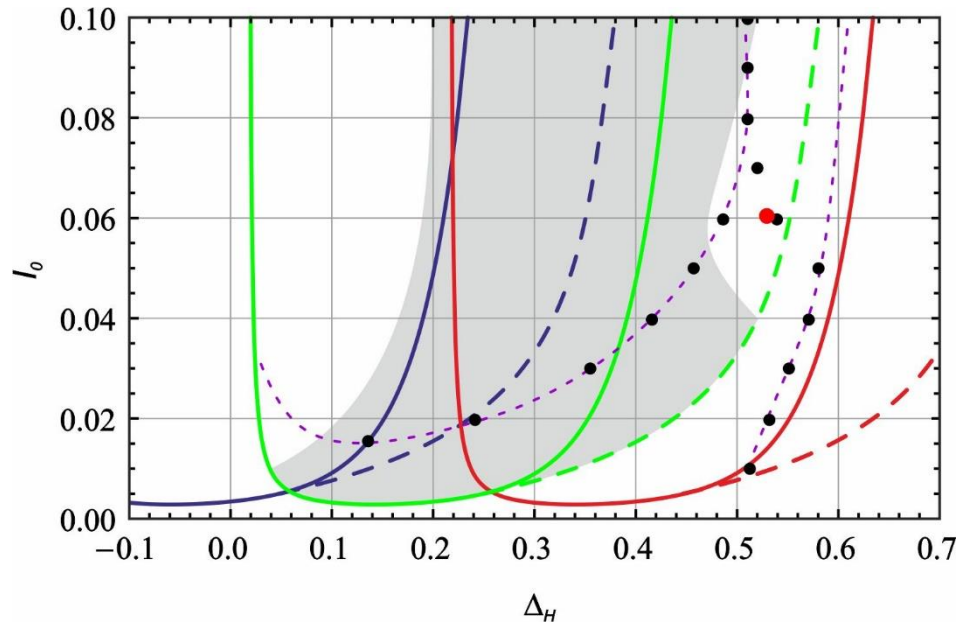


Рис. 3. Зоны генерации трехмодовой модели, на которые нанесены границы области синхронизации для одномодовой (фиолетовые пунктирные линии) и трехмодовой (черные кружки) моделей ($f = 0.05$, $\Omega = -0.45\pi$).

В разделе 3.3 проведено исследование подавления паразитных мод внешним сигналом в гиротроне диапазона 250 ГГц на фронте импульса ускоряющего напряжения. Построена карта режимов автономного и неавтономного гиротрона на плоскости $\Delta_H - I_0$. Численное моделирование проведено для гиротрона с рабочей модой $TE_{19,8}$, представленного в работе [16]. Показано, что воздействие внешним сигналом на начальной стадии переходного процесса позволяет расширить область устойчивости рабочей моды и полностью подавить паразитные колебания при выбросе на фронте импульса напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были получены следующие основные результаты.

1. На основе модифицированной квазилинейной модели был проведен подробный бифуркационный анализ синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом в случаях мягкого и жесткого возбуждения. Построены границы областей синхронизации на плоскости параметров «частота–амплитуда внешнего сигнала». Определены параметры, при которых обеспечивается максимально возможный КПД и широкая полоса синхронизации.

2. Проведено сравнение результатов, полученных для модифицированной квазилинейной теории, с расчетами по уравнениям нестационарной теории гиротрона с фиксированной гауссовой структурой поля. Показано, что результаты хорошо согласуются друг с другом. В частности, расхождение по КПД отличаются на 1-2%.

3. Для трехмодовой модели гиротрона с эквидистантным спектром мод исследовано влияние внешнего сигнала на процессы конкуренции мод. Рассмотрены параметры, примерно соответствующие мегаваттному гиротрону диапазона 170 ГГц для УТС. Показано, что воздействие сигналом, мощность которого составляет ~10% мощности генерации гиротрона, можно осуществить подавление паразитных мод и получить стабильную генерацию на частоте внешнего сигнала с КПД, равным максимальному КПД автономного гиротрона.

4. На примере гиротрона с параметрами, примерно соответствующими мощному гиротрону диапазона 250 ГГц для диагностики и нагрева плазмы показано, что воздействие внешним сигналом на начальной стадии переходного процесса позволяет подавить генерацию паразитных мод при выбросе на фронте импульса напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2004.
2. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
3. Thumm M. Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, No. 3. P. 590-599.
4. Nusinovich G.S., Thumm M.K.A., Petelin M.I. The gyrotron at 50: historical overview // J. Infr. Millim. Terahertz Waves. 2014. Vol. 35, No. 4. P. 325–381.
5. Цимринг Ш.Е. Мазеры на циклотронном резонансе. Горький, 1988. 92 с.
6. Jelonnek J., Aiello G., Alberti S., Avramidis K., et al. Design considerations for future DEMO gyrotrons: A review on related gyrotron activities within EUROfusion. // Fusion Engineering and Design. 2017. Vol. 123. P. 241-246.
7. Denisov G.G., Glyavin M.Y., Fokin A.P., Kuftin A.N., Tsvetkov A.I., Sedov A.S. First experimental tests of powerful 250 GHz gyrotron for future fusion research and collective Thomson scattering diagnostics // Rev. Sci. Instrum. 2018. Vol. 89, No. 8. 084702.
8. Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V. Time-domain self-consistent theory of frequency-locking regimes in gyrotrons with low-Q resonators // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22, No. 3. 033101.
9. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. Стабилизация частоты и фазы многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности внешним сигналом // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 9. С. 41-47.
10. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. Зоны захвата частоты многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности внешним сигналом // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 12. С. 999-1011.
11. Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г., Глявин М.Ю., Рыскин Н.М., Бакунин В.Л., Богдашов А.А., Мельникова М.М., Фокин А.П. Стабилизация частоты гиротрона под влиянием внешнего монохроматического сигнала

- или отраженной от нагрузки волны: обзор // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 1. С. 4-11.
12. Бакунин В.Л., Гузнов Ю.А., Денисов Г.Г., Зайцев Н.И. Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, № 11. С. 38-45.
 13. Bakunin V.L., Denisov G.G., Novozhilova Y.V. Principal enhancement of THz-range gyrotron parameters using injection locking // IEEE Electron Device Lett. 2020. Vol. 41. No. 5. (в печати).
 14. Yakunina K.A., Kuznetsov A.P., Ryskin N.M. Injection locking of an electronic maser in the hard excitation mode // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22. No. 11. 113107.
 15. Zhao Q., Yu S., Zhang T. Startup and mode competition in a 420 GHz gyrotron // Phys. Plasmas. 2017. Vol. 24, No. 9. 093102.
 16. Бакунин В.Л., Глявин М.Ю., Новожилова Ю.В., Седов А.С. Теоретическое исследование нелинейного взаимодействия мод на фронте импульса ускоряющего напряжения в мощном гиротроне с рабочей частотой 250 ГГц // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23, № 6. С. 36-45.
 17. Адилова А.Б., Рыскин Н.М. Исследование синхронизации в системе двух гиротронов с запаздыванием в канале связи на основе модифицированной квазилинейной модели // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 6. С. 68–81.
 18. Преображенская Н.В., Адилова А.Б., Рыскин Н.М. Синхронизация внешним сигналом двухмодовой автоколебательной системы с жестким возбуждением// Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тезисы докладов XIII конференции молодых ученых. 6–8 сентября 2018 г. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2018. С. 230-231.

19. Преображенская Н.В., Рыскин Н.М. Исследование влияния внешнего сигнала на работу многомодового гиротрона// Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тезисы докладов XIV конференции молодых ученых. 17–19 сентября 2019 г. Саратов: Изд-во «Техно-Декор», 2019. С. 194-195.
20. Adilova A.B., Ryskin M.M., Preobrazhenskaya N.V., Ryskin N.M. Influence of Mode Competition on Synchronization in a Gyrotron// Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы международной научно-технической конференции, 27-28 сентября 2018 г., Саратов, Саратовский государственный технический университет. С. 201-205.
21. Адилова А.Б., Преображенская Н.В., Рыскин Н.М. К теории синхронизации двухмодового электронного лазера с жестким возбуждением // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, № 1. С. 19–27.
22. Adilova A.B., Melnikova M.M., Preobrazhenskaya N.V., Rozhnev A.G., Ryskin N.M. Influence of mode competition on phase locking in gyrotrons // 7th Internat. Workshop on Far-Infrared Technol. 2019 (IW-FIRT 2019). March 5-6, 2019, Fukui, Japan. P. 48.
23. Novozhilova Y.V., Bakunin V.L., Preobrazhenskaya N.V., Ryskin N.M., Leshova K.A., Manuilov V.N., Glyavin M.Y. Pulsed gyrotron start-up scenario in presence of voltage/current surge front // 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019) Paris, France.
24. Преображенская Н.В., Рыскин Н.М., Глявин М.Ю., Новожилова Ю.В. Влияние внешнего сигнала на процессы установления колебаний в многомодовом гиротроне. // XII международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур», 1–6 октября 2019 г. Саратов. С. 92.
25. Григорьева Н.В., Рыскин Н.М. Исследование синхронизации гиротрона внешним сигналом на основе модифицированной квазилинейной теории

// XIX научная школа «Нелинейные волны–2020», 29 февраля – 6 марта
2020 г. Нижний Новгород. С. 91.