

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.22>

УДК: 537.86

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ ДВУХ ГИРОТРОНОВ С ОБЩИМ РЕЗОНАНСНЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ

Ю.В. Новожилова, А.А. Богдашов, А.В. Назаровский,
А.П. Фокин, М.Ю. Глявин, Г.Г. Денисов

ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В.Гапонова-Грехова РАН, 603950, Нижний
Новгород, ул. Ульянова, 46

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.

Аннотация. Путем численного моделирования в приближении фиксированной структуры поля исследованы режимы генерации двух гиротронов с общим узкополосным резонансным отражателем. Построены зависимости выходной мощности и КПД генерации, частоты и фазы колебаний каждого гиротрона от параметров системы, таких как ведущее магнитное поле, взаимная отстройка собственных частот гиротронов и запаздывание отраженной волны. На примере гиротронов на частоте 28 ГГц с выходной мощностью до 10 кВт продемонстрирована возможность стабилизации частоты излучения двух гиротронов при отражении части их мощности от внешнего высокодобротного резонатора. Показано, что даже при несовпадении собственных частот резонаторов гиротронов и фаз запаздывания отраженной волны возможно получение стабильных по частоте состояний, в которых разность фаз гиротронов не зависит от времени и от начальных условий, при этом мощность излучения каждого гиротрона превышает мощность автономной генерации.

Ключевые слова: захват частоты гиротрона, численное моделирование, отражение от высокодобротного резонатора.

Финансирование: Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 19-79-30071, <https://rscf.ru/project/23-79-33004/>

Автор для переписки: Новожилова Юлия Владимировна,
julia.novozhilova2009@yandex.ru

Введение

Развитие многих современных направлений физики и техники, таких как установки управляемого термоядерного синтеза [1], ускорители частиц [2], системы беспроводной передачи энергии [3], системы космического запуска [4], плазмохимия [5] и другие, предполагает использование большого числа мощных источников излучения – гиротронов, работающих на единую нагрузку. При этом если для нагрева плазмы когерентное суммирование излучения от нескольких источников не требуется, то для задач ускорения частиц или плазмохимии желательно обеспечить одночастотную и синфазную работу нескольких источников для их последующего сложения. Такие режимы когерентного сложения колебаний могут быть реализованы как при помощи активной синхронизации источников за счет введения внешнего сигнала от единственного стабилизированного источника [6,7], так и за счет пассивных элементов, например, резонансных отражателей [8,9,10]. Экспериментальные исследования [11] показывают эффективность стабилизации частоты одного гиротрона при помощи резонансного отражателя, однако задача стабилизации частоты и фазы нескольких гиротронов, работающих на один резонансный отражатель, до сих не исследовалась.

В данной работе представлены результаты численного моделирования работы двух гиротронов с одним узкополосным резонансным отражателем (рис. 1). Схема и параметры системы для моделирования были выбраны аналогичными использованным в эксперименте [11] – рабочая частота гиротронов около 28 ГГц, ток электронного пучка около 1.5–2 А, выходная мощность до 10 кВт, добротность моды резонатора гиротрона около 3000. В качестве резонансного отражателя, как и в эксперименте, рассматривался внешний высокодобротный резонатор с добротностью около 40000 и коэффициентом отражения по мощности около 10%. Расчеты выполнялись в

модели с фиксированной продольной структурой поля, основные уравнения которой приведены в разделе 1. В разделе 2 показаны полученные результаты расчетов. Выводы приведены в Заключение.

1. Основные уравнения

Расчеты процесса возбуждения колебаний в гиротронах проводились в модифицированной нестационарной самосогласованной модели гиротрона с фиксированной продольной структурой поля, учитывающей наличие отражения от внешнего высокодобротного резонатора. Предположение о фиксированной продольной структуре поля оправдано при достаточно высокой добротности гиротронов, когда ширина линии излучения каждого гиротрона мала по сравнению с шириной полосы циклотронного резонанса (см. [12]): $\omega_{1,2}/Q_{1,2} \ll T_{1,2}^{-1}$, где $\omega_{1,2}$, $Q_{1,2}$ – собственные частоты и добротности резонаторов первого и второго гиротронов, $T_{1,2} = L_{1,2}/(c\beta_{z1,2})$ – время пролета электронов в каждом гиротроне через пространство взаимодействия длиной $L_{1,2}$, $c\beta_{z1,2}$ – продольные скорости электронов в гиротронах, c – скорость света.

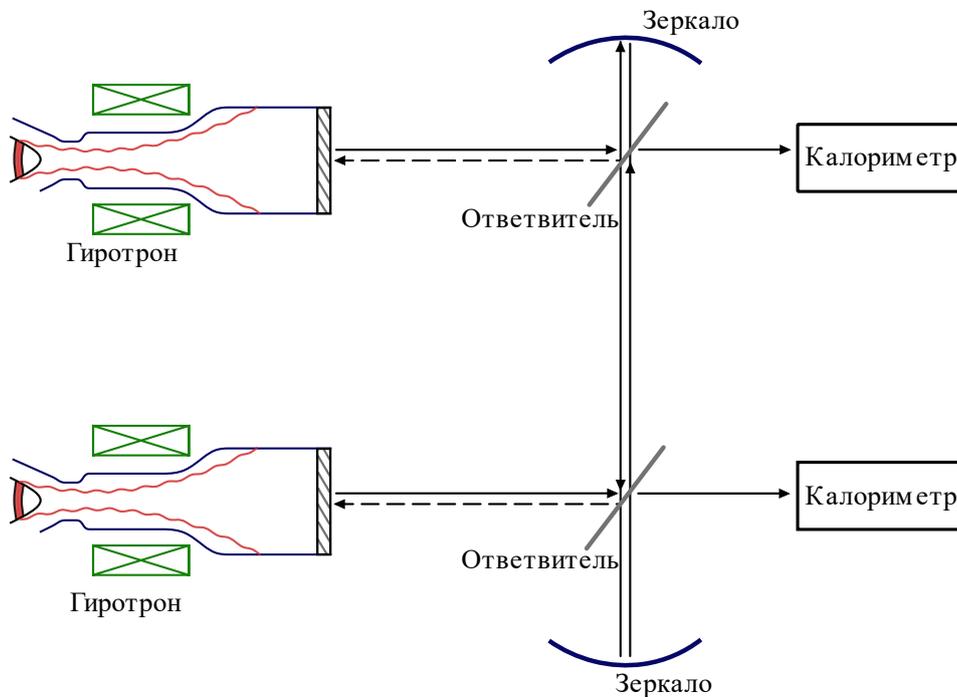


Рис. 1. Схема двух идентичных гиротронов с отражением от высокодобротного резонатора

Предполагаем, что в резонаторе каждого гиротрона существует единственная поперечная мода и что продольная структура поля фиксирована и имеет одну продольную вариацию. Одномодовое приближение справедливо в области параметров, соответствующих зоне генерации рабочей моды каждого гиротрона.

Возбуждение полей в гиротронах и внешнем резонаторе можно описать уравнениями трех связанных осцилляторов:

$$\frac{dF_1}{d\tau} + \frac{nQ_3}{Q_1} F_1 + i2\delta_1 Q_3 F_1 = \frac{iQ_3}{Q_1} I_1 \chi_1 + \frac{2R_1 Q_3 n}{Q_1} e^{-i\theta_1} F_3, \quad (1)$$

$$\frac{dF_2}{d\tau} + \frac{nQ_3}{Q_2} F_2 + i2Q_3 \delta_2 F_2 = \frac{iQ_3}{Q_2} I_2 \chi_2 + \frac{2Q_3 R_2 n}{Q_2} e^{-i\theta_2} F_3, \quad (2)$$

$$\frac{dF_3}{d\tau} + F_3 = A_1 F_1 + A_2 F_2, \quad (3)$$

здесь $F_{1,2}$, F_3 – комплексные амплитуды полей в двух гиротронах и внешнем резонаторе соответственно, $\tau = \omega_3 t / (2Q_3)$ – безразмерное время, ω_3 – собственная частота отражающего резонатора. Амплитуды полей в гиротронах на рабочих модах TE_{m_s, q_s} (m_s – азимутальный и q_s – радиальный индексы, $s = 1, 2$ – номер гиротрона) связаны с электрическими полями этих мод соотношением:

$$\vec{E}_s = \text{Re} \left(\frac{mc^2 u(z) F_s(t) \exp(i\omega_{ex} t) 2^{n-1} n! \left[\vec{z}_0, \nabla_{\perp} \Psi_s \left(\vec{r}_{\perp} \right) \right]}{en\beta_{\perp 0s}^{n-4} J_{m_s-n} \left(v_{m_s, q_s} R_{bs} / \bar{R}_{rs} \right) n^n} \right). \quad (4)$$

В (1)–(4) s – номер гиротрона, n – номер гармоники, на которой работают гиротроны, e и m – заряд и масса электрона, $\Psi_s \left(\vec{r}_{\perp} \right) = J_{m_s} \left(\varkappa_s r \right) \exp(-im_s \psi)$ – мембранная функция, r и ψ – полярные координаты, $J_{m_s} \left(\varkappa_s r \right)$ – функция Бесселя порядка m_s , $\varkappa_s = v_{m_s, q_s} / \bar{R}_{rs}$ – поперечное волновое число рабочей моды на ее критической частоте в регулярной части резонатора каждого гиротрона, v_{m_s, q_s} – q_s -й нуль производной функции Бесселя: $J_{m_s}' \left(v_{m_s, q_s} \right) = 0$; R_{bs} , \bar{R}_{rs} – радиусы электронных пучков и однородных участков резонатора

соответственно. Предполагаем, что продольная структура поля $u(z)$ в обоих гиротронах одинакова и совпадает с собственной функцией рабочей моды для «холодного» (без электронного пучка) резонатора. Параметры тока $I_{1,2}$ – параметры тока, $\chi_{1,2}$ – нелинейные активные восприимчивости, вносимые активной средой (электронным пучком) в резонаторы гиротронов, $R_{1,2}$ – коэффициенты отражения излучения первого и второго гиротронов от внешнего резонатора, $A_{1,2}$ – коэффициенты возбуждения внешнего резонатора гиротронами, $\delta_s = n - n \frac{\omega_s}{\omega_3}$ – безразмерные расстройки между собственными частотами резонаторов каждого гиротрона и внешнего резонатора. Уравнения (1), (2) в отсутствие внешнего резонатора совпадают с известными одномодовыми уравнениями возбуждения полей гиротрона [12].

Функции восприимчивости $\chi_{1,2}(|F_{1,2}|, \Delta_{1,2})$ в каждом гиротроне:

$$\chi_s = \int_0^{\zeta_{1,2}} u^*(\zeta) \langle p_s \rangle_{\vartheta_0} d\zeta \quad (5)$$

могут быть найдены из решения уравнений движения:

$$\frac{dp_s}{d\zeta} + i(\Delta_s + |p_s|^2 - 1)p_s = iF_s u(\zeta) (p_s^*)^{n-1}. \quad (6)$$

Угловые скобки в (5) означают усреднение по начальной фазе поперечного импульса ϑ_0 относительно рабочей моды и по азимутальной координате ψ

ведущих центров электронных орбит, $\zeta = \frac{\beta_{\perp}^2 \omega_0 z}{2\beta_z c}$ – безразмерная продольная

координата; $I_s = 2.35 \times 10^{-4} I_{sA} \left(\frac{n^{n+1}}{2^{n-1} n!} \right)^2 \left(\frac{Q_s G_{m_s q_s} \beta_{\perp}^{2n-4}}{\gamma \beta_z} \right) / N_s$ – безразмерные

параметры тока, $N_s = \int_0^{\zeta_{\text{ex } s}} |u(\zeta)|^2 d\zeta$ – нормы полей, I_{sA} – токи в амперах,

$G_{m_s q_s} = \left(J_{m_s-1}(\nu_{m_s q_s} R_b / \bar{R}_r) / J_{m_s}(\nu_{m_s q_s}) \right)^2 / (\nu_{m_s q_s}^2 - m_s^2)$ – коэффициенты связи

между электронным пучком и модой TE_{m,q_s} , $\zeta_{ex\ s}$ – координаты выходного сечения гиротронов.

Предполагаем, что поле во внешнем резонаторе имеет продольное распределение (в направлении от зеркала к зеркалу) в виде стоячей волны и гауссову структуру в поперечном направлении, как и при расчетах открытого резонатора для эксперимента [13]. Как следует из уравнений (1)–(3), на режим работы каждого из гиротронов влияет величина произведения $A_{1,2} R_{1,2}$, а не каждый из этих параметров в отдельности. Усреднение в (1)–(3), (6) проведено по собственной частоте внешнего резонатора ω_{ex} .

Следует отметить, что система уравнений (1)–(3) описывает колебания трех связанных осцилляторов. Подобный подход для описания взаимодействия одного генератора с внешним резонатором (т. е. двух связанных осцилляторов) использовался в [10], тогда как в [8,9] отражение от внешнего резонатора описывалось с помощью частотно-зависимого коэффициента отражения. Представляется, что описание внешнего резонатора как осциллятора, возбуждаемого гиротронами, более корректно, поскольку учитывает переходные процессы в этом резонаторе.

2. Результаты моделирования

Численное моделирование уравнений (1)–(3), (6) проводилось для двух одинаковых гиротронов, собственные частоты которых могли слегка отличаться друг от друга и от собственной частоты внешнего резонатора. Гиротроны работают на второй гармонике гирочастоты ($n=2$).

В работе [14] аналитически показано, что как и для одного гиротрона, так и для двух гиротронов частота генерации может быть стабилизирована при отражении небольшой части мощности излучения от внешнего высокочастотного резонатора при выполнении условия для коэффициентов отражения, возбуждения и добротности, аналогичного условию (32) в [14]:

$$\frac{Q_{1,2}}{2Q_3} \ll A_{1,2} |R_{1,2}| \ll 1. \quad (7)$$

В рассматриваемой системе выбраны параметры $Q_{1,2} = 3127.5$, $Q_3 = 40000$, $A_{1,2} |R_{1,2}| = 0.12-0.14$, так что соотношение (7) выполняется.

Исследовано изменение частоты генерации обоих гиротронов в зависимости от ведущего магнитного поля в каждом гиротроне (расстройки циклотронного резонанса Δ , она выбиралась одинаковой в обоих гиротронах), фаз запаздывания (расстояния до отражателя, они выбирались как одинаковыми, так и различными), разности собственных частот гиротронов, пропорциональной $\delta_2 - \delta_1$. При этом, как показывают расчеты, для полностью идентичных гиротронов, в полном соответствии с аналитическими исследованиями [14], на модуляционных характеристиках (графиках зависимости частоты генерации от циклотронной расстройки Δ) в области резонанса частот свободной генерации и собственной частоты внешнего резонатора образуется очень пологое плато, где частота излучения стабильна и мало меняется при изменении Δ (рис. 2а). В стабилизированном состоянии возбуждается внешний резонатор (рис. 2б), слегка увеличивается орбитальный КПД и амплитуды полей гиротронов по сравнению с автономной (без отражений) генерацией (рис. 2в,г). При увеличении связи гиротрона с внешним резонатором происходит падение КПД гиротронов, поэтому такие режимы не рассматривались.

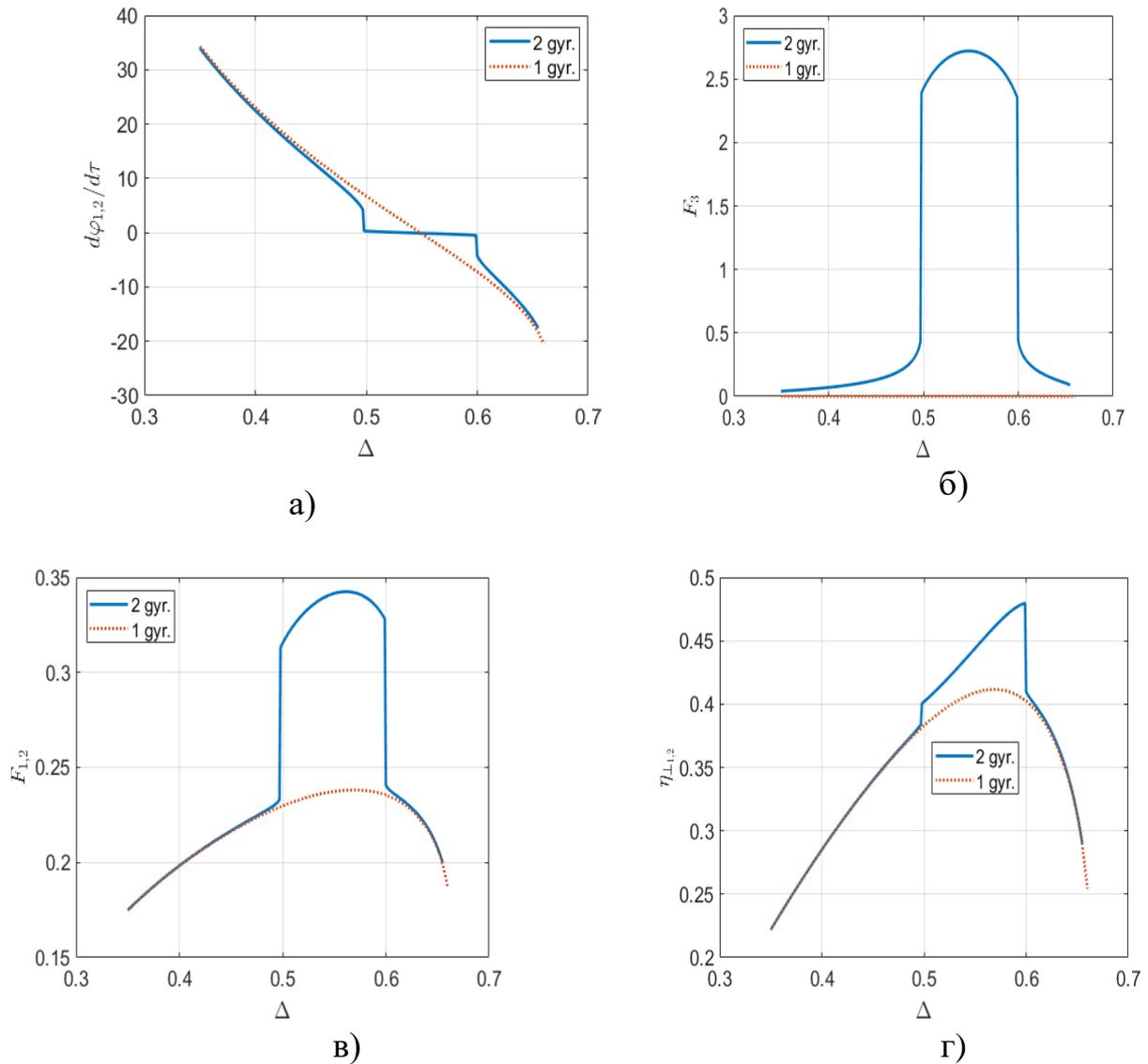


Рис. 2. Зависимости от циклотронной расстройки Δ (а) частоты излучения гиротронов $d\varphi/d\tau$ (φ_s – фазы комплексных амплитуд F_s), (б, в) амплитуд полей в гиротронах и внешнем резонаторе, (г) поперечного КПД гиротронов. $I_A = 1.6$

$$A, I_{1,2} = 0.44097, Q_{1,2} = 3127.5553, Q_3 = 40000, A_{1,2}|R_{1,2}| = 0.12.$$

$$\theta_{1,2} = 0, \delta_{1,2} = 0.0002144$$

Более интересен с практической точки зрения случай, когда собственные частоты гиротронов слегка различны, а также различны фазы запаздывания, определяемые расстоянием гиротронов до отражателя. Сильное различие собственных частот приводит к тому, что стабилизированное состояние, когда колебания всей системы происходят на одинаковой частоте, недостижимо.

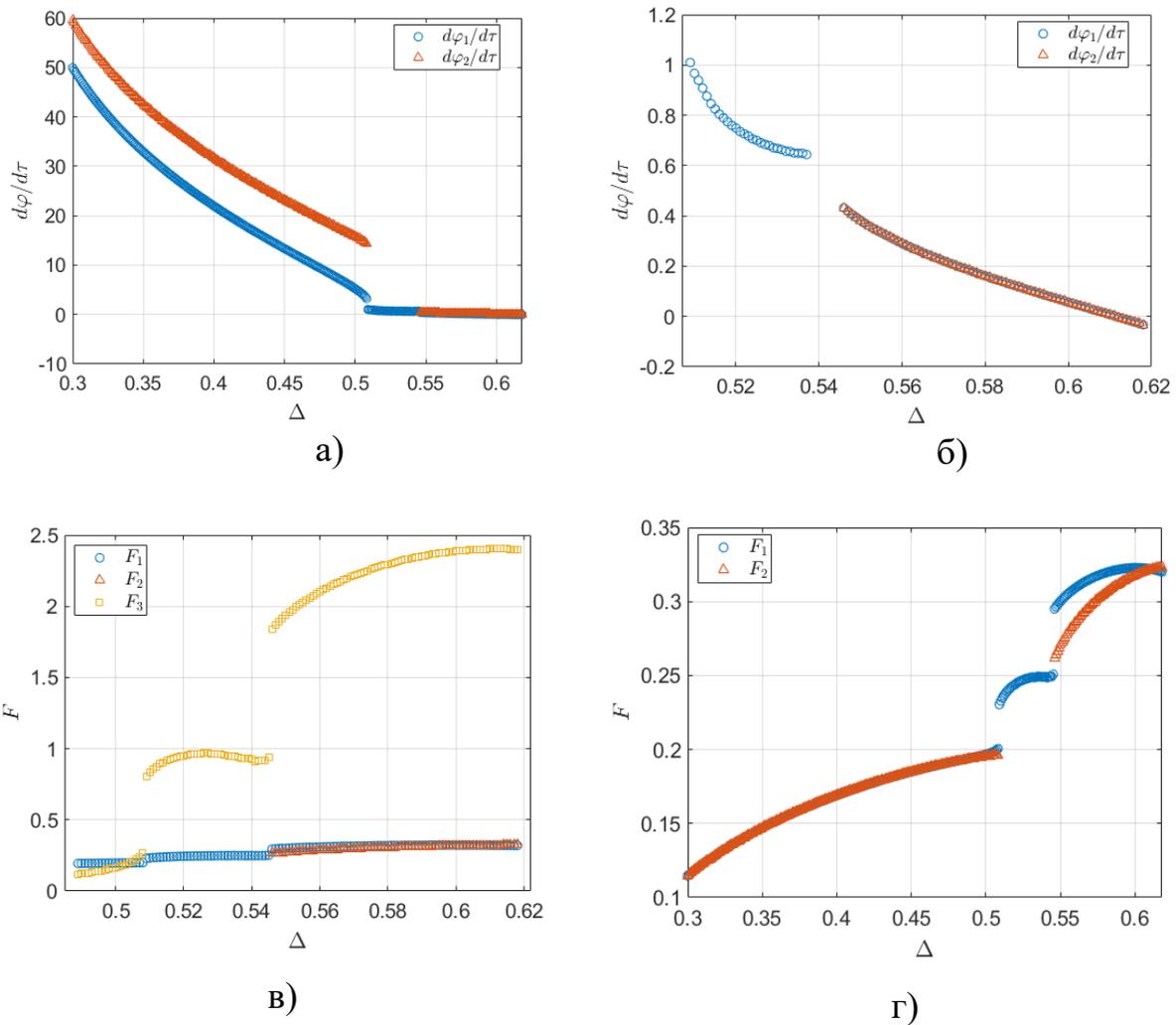


Рис. 3. Зависимости от циклотронной расстройки Δ (а, б) частоты излучения гиротронов $d\varphi_s/d\tau$ (φ_s – фазы комплексных амплитуд F_s), (в, г) амплитуд полей в гиротронах и внешнем резонаторе. $I_A=1.6$ А, $I_{1,2} = 0.44097$, $Q_{1,2} = 3127.5553$, $Q_3 = 40000$, $A_{1,2}|R_{1,2}|=0.14$. $\theta_{1,2} = 0$, $\delta_1 = 0.0002144$, $\delta_2 = 0.0000944$

Если расстройка собственных частот гиротронов невелика, так что частоты автономных колебаний гиротронов лежат внутри ширины полосы захвата гиротронов отраженной волной [10], возможны стабильные по частоте состояния, когда колебания гиротронов и внешнего резонатора происходят на одинаковой частоте (рис. 3–5, панель (а, б)). Длина интервала ведущих магнитных полей, соответствующих стабилизированному состоянию, зависит от фаз запаздывания гиротронов. Рисунки 3–5 соответствуют различным фазам запаздывания второго гиротрона при одинаковой фазе запаздывания первого гиротрона. При неблагоприятных фазах запаздывания стабилизированные по частоте состояния существуют в меньшем интервале циклотронных расстроек,

чем при благоприятных, и есть области циклотронных расстройек, где стационарные состояния не существуют (рис. 3б). В стабилизированных состояниях происходит возбуждение внешнего резонатора (рис.3–5, панели (в)), при этом амплитуды полей гиротронов возрастают (рис. 3–5, панели (г)). За пределами стабилизированных состояний средняя частота каждого гиротрона близка к его автономной частоте (рис. 3–5, панель (а)), а поскольку эти частоты различны, наблюдаются биения частот и амплитуд полей в гиротронах и внешнем резонаторе.

Если состояние гиротрона стабилизировано, то независимо от начальных фаз полей гиротронов после процессов установления колебаний вырабатывается определенная разность фаз, то есть гиротроны излучают когерентно (рис. б).

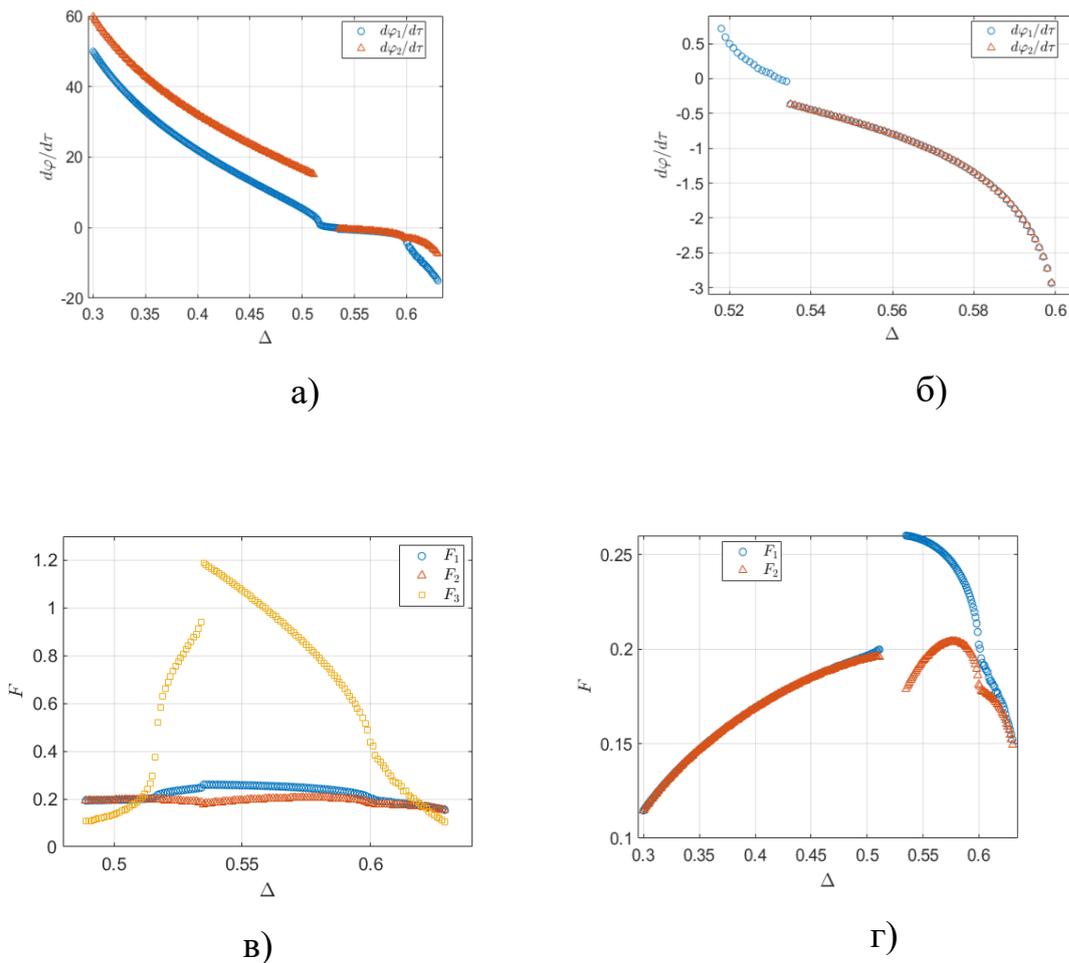


Рис. 4. Зависимости от циклотронной расстройки Δ (а, б) частоты излучения гиротронов $d\varphi_s/d\tau$ (φ_s – фазы комплексных амплитуд F_s), (в, г) амплитуд полей в гиротронах и внешнем резонаторе. $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi$, остальные параметры такие же, как в подписи к рис. 3.

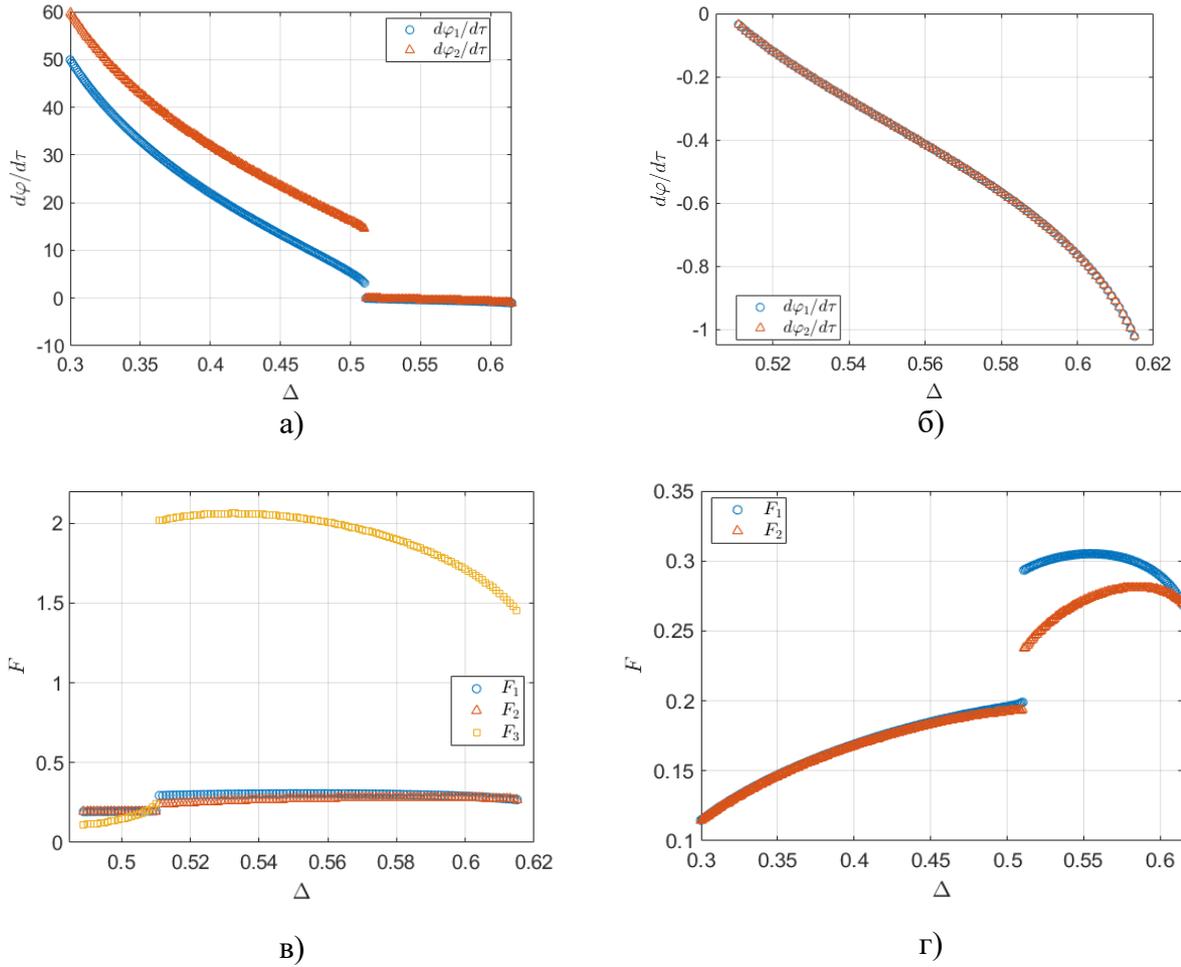


Рис. 5. Зависимости от циклотронной расстройки Δ (а, б) частоты излучения гиротронов $d\varphi/d\tau$ (φ_s – фазы комплексных амплитуд F_s), (в, г) амплитуд полей в гиротронах и внешнем резонаторе. $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi/2$, остальные параметры такие же, как в подписи к рис. 3

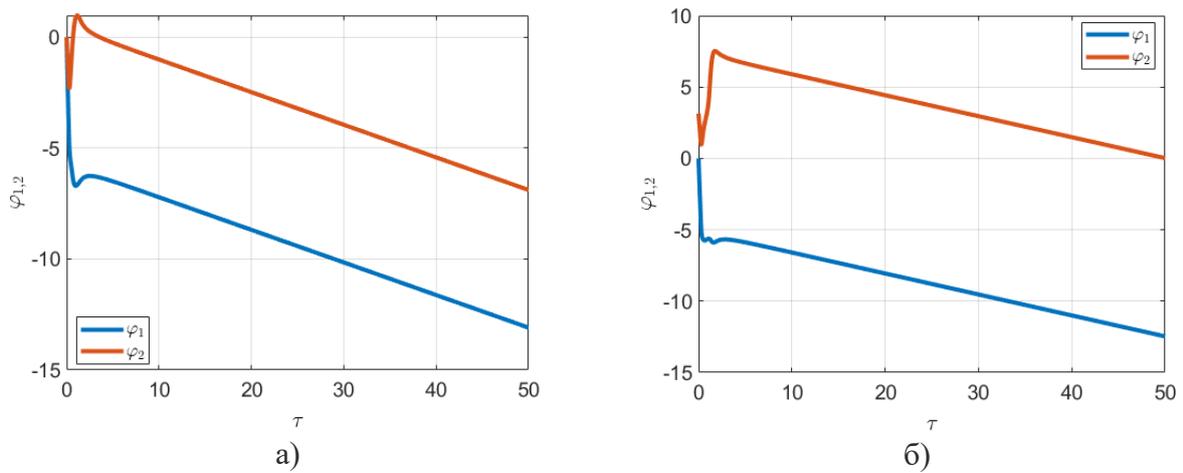


Рис. 6. Зависимость фаз полей в гиротронах от времени при $\Delta=0.567$ и различных начальных условиях: а) $\varphi_s(0)=0$, $\varphi_1(50)-\varphi_2(50)=-1,9753\pi$; б) $\varphi_1(0)=0$, $\varphi_2(0)=\pi$, $\varphi_1(50)-\varphi_2(50)=-3,9753\pi$, остальные параметры такие же, как в подписи к рис. 3

Заключение

Путем численного моделирования продемонстрирована возможность стабилизации частоты излучения двух гиротронов при отражении части их мощности от внешнего высокодобротного резонатора. Показано, что даже при несовпадении собственных частот резонаторов гиротронов и фаз запаздывания отраженной волны возможно получение стабильных по частоте состояний, в которых разность фаз гиротронов не зависит от времени и от начальных условий, при этом мощность излучения каждого гиротрона превышает мощность автономной генерации.

Финансирование: Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 19-79-30071, <https://rscf.ru/project/23-79-33004/>

Литература

1. Thumm M. K. A. et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nuclear Fusion. – 2019. – Т. 59. – №. 7. – С. 073001.
2. Othman M. A. K. et al. Experimental demonstration of externally driven millimeter-wave particle accelerator structure // Applied Physics Letters. – 2020. – Т. 117. – №. 7.
3. Mizojiri S. et al. Subterahertz wireless power transmission using 303-GHz rectenna and 300-kW-class gyrotron // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2018. – Т. 28. – №. 9. – С. 834-836.
4. Fukunari M. et al. Rocket propulsion powered using a gyrotron // Journal of Energy and Power Engineering. – 2017. – Т. 11. – №. 6. – С. 363-371.
5. Sintsov S. V. et al. Decomposition of carbon dioxide in a discharge maintained by continuous focused sub-terahertz radiation at atmospheric pressure // Technical Physics Letters. – 2023. – Т. 49. – № 1. С. 44.
6. Bakunin V. L., Denisov G. G., Novozhilova Y. V. Frequency and phase stabilization of a multimode gyrotron with megawatt power by an external signal // Technical Physics Letters. – 2014. – Т. 40. – С. 382-385.

7. Kuftin A. N. et al. First demonstration of frequency-locked operation of a 170 GHz/1 MW gyrotron // IEEE Electron Device Letters. – 2023.
8. Glyavin M. Y. et al. Stabilization of gyrotron frequency by reflection from nonresonant and resonant loads // Technical Physics Letters. – 2015. – Т. 41. – С. 628-631.
9. Zotova I. V. et al. Frequency locking and stabilization regimes in high-power gyrotrons with low-Q resonators // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2016. – Т. 58. – С. 684-693.
10. Novozhilova Y. V., Ishenko A. S. Analytical theory of an RF generator phase-locked by the resonant load with delayed reflection // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2011. – Т. 32. – С. 1394-1406.
11. Fokin A. P. et al. Experimental demonstration of gyrotron frequency stabilization by resonant reflection // IEEE Electron Device Letters. – 2021. – Т. 42. – №. 7. – С. 1077-1080.
12. Nusinovich G. S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. – JHU Press, 2004.
13. Богдашов А. А. и др. Резонансные отражатели для экспериментального исследования влияния отраженного сигнала на режимы работы гиротронов // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – №. 5-6.
14. Новожилова Ю.В., Богдашов А.А., Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Фокин А.П., Назаровский А.В., Розенталь Р.М. Исследование возможности стабилизации частоты двух гиротронов при воздействии отражения от внешнего высокодобротного резонатора // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.23>

Для цитирования:

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