

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.23>

УДК: 537.86

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ДВУХ ГИРОТРОНОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТРАЖЕНИЯ ОТ ВНЕШНЕГО ВЫСОКОДОБРОТНОГО РЕЗОНАТОРА

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

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. Аналитически показана возможность стабилизации частоты двух гиротронов с близкими параметрами при отражении части их излучения от внешнего высокодобротного резонатора и исследована устойчивость стабилизированных состояний. Анализ стационарных состояний, в которых генераторы излучают когерентно, показывает, что частота излучения может быть стабилизирована, если добротность внешнего резонатора достаточно велика. При этом изменение параметров системы приводит к существенно меньшим изменениям частоты генерации, чем в отсутствие отражений: в достаточно широком интервале параметров частота излучения гиротронов может удерживаться в пределах полосы внешнего резонатора. При возрастании и убывании собственных частот резонаторов гиротронов может наблюдаться гистерезис и скачки частоты излучения. Исследование устойчивости при оптимальной фазе запаздывания показывает, что стабилизированные по частоте состояния устойчивы. При малом отклонении от этих состояний быстрее всего убывают возмущения амплитуд гиротронов. На следующем этапе, за большее время происходит установление стационарных значений фаз гиротронов. На

последнем, самом длительном этапе, устанавливаются стационарные значения амплитуды и фазы внешнего резонатора.

Ключевые слова: гиротрон, связанные генераторы, стабилизация частоты, внешний резонатор.

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

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

Введение

Гиротроны в настоящее время являются наиболее востребованным источником излучения в микроволновом диапазоне и используются для различных приложений: от спекания керамики до нагрева плазмы в крупных установках УТС, а также в плазменных экспериментах и спектроскопии [1–4]. Для многих приложений, в частности, в диагностике плазмы и спектроскопии, важным требованием является стабилизация частоты излучения гиротрона. Одним из методов стабилизации частоты является отражение части излучения от внешней резонансной нагрузки (высокодобротного резонатора). Этот метод известен и используется для магнетронов и лазеров [5–12]. Для гиротронов этот метод до недавнего времени исследовался только теоретически [13–16]. Несколько лет назад в ИПФ РАН впервые экспериментально наблюдалась эффективная стабилизация частоты гиротрона при отражении части его излучения от внешнего квазиоптического резонатора [17].

В данной работе аналитически исследована возможность стабилизации частоты двух генераторов-гиротронов при отражении части их излучения от общего внешнего высокодобротного резонатора. Такая задача представляет интерес не только для приложений, где требуется излучение со стабильной частотой, но в перспективе для создания комплекса когерентно излучающих гиротронов [18]. Подобные задачи о взаимном влиянии и возможности когерентного излучения двух гиротронов рассматривались в [19–21], однако в

этих работах гиротроны были связаны через нерезонансный отражатель, и возможность стабилизации их частоты не рассматривалась.

В разделе 1 данной работы приведены уравнения для гиротронов и отражающего внешнего резонатора и показана возможность стабилизации частоты обоих гиротронов. В разделе 2 аналитически исследована устойчивость состояний со стабильной частотой и влияние разности начальных случайных фаз поля излучения гиротронов на процесс стабилизации частоты. В заключении приведены основные результаты.

1. Основные уравнения. Возможность стабилизации частоты

Как показано в работах [5–16], для эффективной стабилизации частоты одного автогенератора отражением от внешнего резонатора необходимо, чтобы собственные частоты резонансных систем генератора ω_0 и отражателя ω_{ex} были близки между собой в масштабе ширины полосы захвата генератора отраженной волной:

$$|\omega_{ex} - \omega_0| < \omega_0 |R| / Q_0, \quad (1)$$

добротность внешнего резонатора была существенно выше добротности резонансной системы автогенератора:

$$Q_0 / Q_{ex} \ll |R| \ll 1, \quad (2)$$

и расстояние до отражателя было таким, чтобы отраженная волна возвращалась в автогенератор синфазно с полем генератора. Здесь Q_0, Q_{ex} – добротности резонансных систем генератора и отражателя соответственно, R – коэффициент отражения.

Рассмотрим схему двух генераторов-гиротронов с общим внешним высокодобротным отражателем (рис. 1).

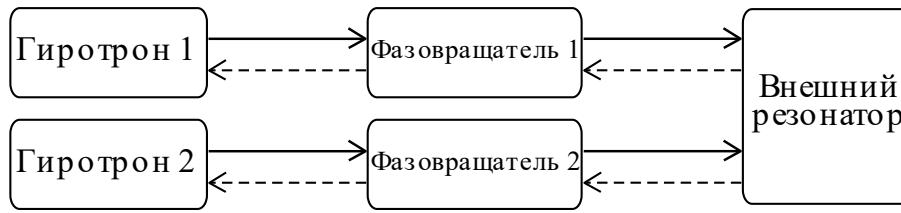


Рис.1. Схема двух гиротронов, связанных с внешним слабо отражающим высокодобротным резонатором

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

$$\frac{dY_1}{d\tau} + \kappa_1 Y_1 = m_1 Y_3 e^{-i\theta_1}, \quad (3)$$

$$\frac{dY_2}{d\tau} + \kappa_2 Y_2 = m_2 Y_3 e^{-i\theta_2}, \quad (4)$$

$$\frac{dY_3}{d\tau} + Y_3 = Y_1 + Y_2. \quad (5)$$

Подобная система уравнений для одного автогенератора с внешней высокодобротной нагрузкой была рассмотрена в [13]. Такие уравнения справедливы для автогенераторов в пренебрежении изменениями продольной структуры поля в пространстве взаимодействия. В резонаторе гиротрона это предположение оправдано при достаточно высокой его добротности, когда время пролета электронов через резонатор гиротрона мало по сравнению с характерными временами переходных процессов.

При получении (3)–(5) в качестве опорной частоты была выбрана собственная частота внешнего резонатора; индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму гиротрону, индекс 3 – внешнему высокодобротному резонатору. $Y_{1,2,3}$ – комплексные амплитуды полей в генераторах и внешнем резонаторе, $\tau = \omega_3 t / (2Q_3)$ – безразмерное время, ω_3, Q_3 – собственная частота и добротность внешнего резонатора, $m_{1,2} = 2|R_{1,2}|Q_3/Q_{1,2}$ – коэффициенты связи каждого гиротрона с внешним резонатором. Коэффициенты $R_{1,2}$ – это коэффициенты отражения: в стационарном режиме генерации каждого

гиротрона (при равенстве нулю поля в другом гиротроне) они равны отношению амплитуды поля в отраженной волне к амплитуде поля внутри резонатора гиротрона. Считаем, что коэффициенты связи велики: $m_{1,2} \gg 1$ – это условие аналогично неравенству (2). В (3), (4) $\kappa_{1,2}$ – нелинейные функции частоты, амплитуды осцилляций и параметров автогенераторов, которые могут быть представлены как:

$$\kappa_{1,2} = \kappa_{e1,2} + \kappa_{a1,2}, \quad (6)$$

с первым слагаемым, равным:

$$\kappa_{e1,2} = \frac{Q_3}{Q_{1,2}} + 2i \frac{Q_3}{\omega_3} (\omega_3 - \omega_{1,2}), \quad (7)$$

где $\omega_{1,2}, Q_{1,2}$ – собственные частоты и добротности резонаторов гиротронов, а слагаемые $\kappa_{a1,2}$ пропорциональны активной проводимости, вносимой электронным пучком в резонатор каждого гиротрона, $\theta_{1,2} = \omega_3 l / c$ – фазы запаздывания в цепи обратной связи для каждого резонатора, l – длина линии запаздывания. Считаем, что внешний резонатор находится не слишком далеко от каждого гиротрона, так что изменением фазы запаздывания из-за отличия частоты генерации от частоты внешнего резонатора можно пренебречь. Поскольку предполагается, что время пролета электронов через резонатор каждого гиротрона много меньше времени затухания колебаний в этих резонаторах $Q_{1,2}/\omega_{1,2}$, изменением функций $\kappa_{1,2}$ при изменении частоты генерации можно пренебречь.

Найдем стационарные решения (3)–(5) и, пользуясь методикой, предложенной в [13-15], найдем разность частот генерации каждого гиротрона в двух соседних стационарных состояниях, отличающихся собственными частотами свободной генерации, и условия стабилизации частоты генераторов. В стационарном состоянии колебания обоих гиротронов и внешнего резонатора происходят на одной и той же частоте ω . Комплексные амплитуды генераторов и внешнего резонатора имеют вид:

$$Y_{1,2,3} = y_{1,2,3} e^{i\tau\Omega} e^{i\varphi_{01,2,3}}, \quad (8)$$

где $y_{1,2,3} = const$ – модули комплексных амплитуд, $\Omega = (\omega - \omega_3) 2Q_3 / \omega_3 = const$ – безразмерная отстройка частоты генерации от собственной частоты внешнего резонатора ω_3 ; $\varphi_{01,2,3}$ – начальные фазы колебаний в генераторах и внешнем резонаторе. В отсутствие связи стационарные решения определяются уравнениями:

$$i\Omega_{1,2} + \kappa_{1,2} = 0, \quad y_3 = 0. \quad (9)$$

Как следует из (9):

$$\kappa'_{01,2} = 0, \quad \kappa''_{01,2} = \Omega_{1,2}, \quad (10)$$

где $\kappa'_{01,2}, \kappa''_{01,2}$ – соответственно действительная и мнимая части нелинейных функций $\kappa_{1,2}$ каждого генератора в отсутствие связи. Стационарные значения амплитуд $y_{1,2} = y_{01,2}$ и отстройки безразмерных частот $\Omega_{1,2} = (\bar{\omega}_{1,2} - \omega_3) 2Q_3 / \omega_3$ определяются из уравнений (10). Здесь $\bar{\omega}_{1,2}$ – частоты генерации каждого гиротрона в автономном состоянии (без связи).

Поскольку при малом отражении сдвиг амплитуды и частоты каждого генератора относительно их значений в свободном состоянии достаточно мал:

$$y_{1,2} = y_{01,2} + \tilde{y}_{1,2}, \quad |\tilde{y}_{1,2}| \ll y_{01,2}, \quad \Omega = \Omega_{1,2} + \Delta\Omega_{1,2}, \quad (11)$$

функции $\kappa'_{1,2}, \kappa''_{1,2}$ можно разложить вблизи их значений $\kappa'_{01,2}, \kappa''_{01,2}$:

$$\kappa'_{1,2} \approx \nu_{1,2} \tilde{y}_{1,2}, \quad \kappa''_{1,2} \approx -\Omega_{1,2} + \mu_{1,2} \tilde{y}_{1,2}, \quad (12)$$

где $\nu_{1,2} = \left. \frac{\partial \kappa'_{1,2}}{\partial y_{1,2}} \right|_{y_{1,2}=y_{01,2}}, \quad \mu_{1,2} = \left. \frac{\partial \kappa''_{1,2}}{\partial y_{1,2}} \right|_{y_{1,2}=y_{01,2}}$ – частные производные по амплитудам колебаний. Из (5) в первом приближении следует:

$$(i\Omega + 1)y_3 = y_{01} e^{i\varphi_1} + y_{02} e^{i\varphi_2}, \quad (13)$$

где $\varphi_{1,2} = \varphi_{01,2} - \varphi_{03}$. Линеаризуем уравнения (3), (4) по малым добавкам к частоте и амплитуде при наличии связи, считая, что поле во внешнем резонаторе

определяется свободными решениями для полей гиротронов (13). В результате получим:

$$(i\Delta\Omega_1 + \nu_1\tilde{y}_1 + i\mu_1\tilde{y}_1)(i\Omega + 1) = m_1 e^{-i\theta_1} \left(1 + \frac{y_{02} e^{i\Delta\varphi}}{y_{01}} \right), \quad (14)$$

$$(i\Delta\Omega_2 + \nu_2\tilde{y}_2 + i\mu_2\tilde{y}_2)(i\Omega + 1) = m_2 e^{-i\theta_2} \left(1 + \frac{y_{01}}{y_{02} e^{i\Delta\varphi}} \right), \quad (15)$$

здесь $\Delta\varphi = \varphi_{02} - \varphi_{01}$. Записывая мнимые и действительные части равенств (14), (15) по отдельности, найдем нормированную частоту свободной генерации каждого гиротрона в зависимости от нормированной частоты генерации в связанном стационарном состоянии (см. рис. 2):

$$\Omega_{1,2} = \Omega + \frac{m_{1,2}}{1 + \Omega^2} \left[(r_{1,2} + \Omega) A_{1,2} + (r_{1,2}^{-1} - \Omega) B_{1,2} \right], \quad (16)$$

где:

$$A_{1,2} = \frac{y_{02,1}}{y_{01,2}} \cos(\theta_{1,2} \mp \Delta\varphi) + \cos\theta_{1,2}, \quad (17)$$

$$B_{1,2} = r_{1,2} \left(\frac{y_{02,1}}{y_{01,2}} \sin(\theta_{1,2} \mp \Delta\varphi) + \sin\theta_{1,2} \right), \quad r_{1,2} = \frac{\mu_{1,2}}{\nu_{1,2}}. \quad (18)$$

Как следует из (16), производная от собственной частоты свободного гиротрона по частоте излучения (частоте связанных колебаний ω) может быть велика, порядка $m_{1,2} \gg 1$. При этом частота излучения стабилизируется, ее изменения существенно меньше возможных изменений частоты свободной генерации.

Частота свободной генерации линейно зависит от собственной частоты резонатора каждого гиротрона (см. (6), (7), (10)):

$$\Omega_{1,2} = 2 \frac{Q_3}{\omega_3} (\omega_{1,2} - \omega_3) - \kappa''_{a1,2} (y_{01,2}), \quad (19)$$

что позволяет получить из (16) соотношение между собственной частотой резонатора каждого гиротрона и частотой связанных колебаний:

$$\omega_{1,2} = \omega + \frac{\omega_3}{2Q_3} \left\{ \kappa''_{a1,2} + \frac{m_{1,2}}{1 + \Omega^2} \left[(r_{1,2} + \Omega) A_{1,2} + (r_{1,2}^{-1} - \Omega) B_{1,2} \right] \right\}. \quad (20)$$

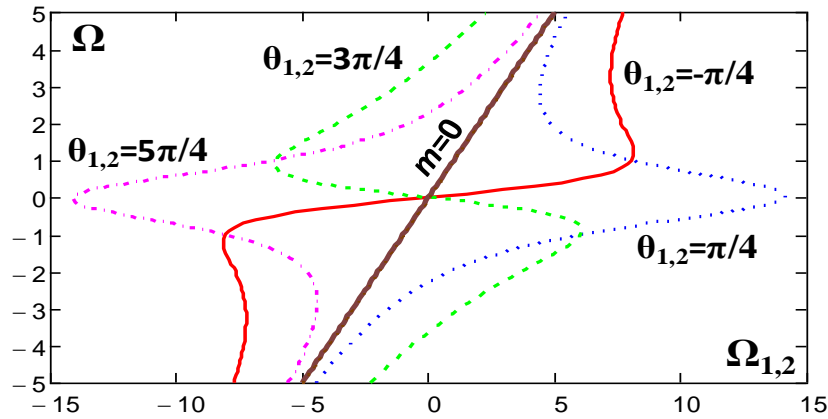


Рис. 2. Зависимости частоты излучения от собственных частот генераторов в случае одинаковых генераторов, одинаковых коэффициентов связи и одинаковых фаз запаздывания, рассчитанные по формуле (16) при $\Delta\varphi=0$; $m_{1,2}=5$; $\mu_{1,2}/\nu_{1,2}=1$. Коричневая сплошная линия – отражений нет, красная линия – оптимальные фазы запаздывания; синяя, сиреневая, зеленая линии – неоптимальные фазы запаздывания $\theta_{1,2}$

Оптимальные фазы запаздывания можно найти, записав производные от частот свободной генерации по частоте связанных колебаний $\Omega'_{1,2}(\Omega)$:

$$\Omega'_{1,2}(\Omega) = 1 - \frac{2\Omega m_{1,2}}{(1 + \Omega^2)^2} \left[(r_{1,2} + \Omega) A_{1,2} + (r_{1,2}^{-1} - \Omega) B_{1,2} \right] + \frac{m_{1,2}}{1 + \Omega^2} [A_{1,2} - B_{1,2}]. \quad (21)$$

Производная $\Omega'_{1,2}(\Omega)$ максимальна в точке $\Omega=0$, где частоты свободной генерации гиротронов равны собственной частоте внешнего резонатора, при условии

$$B_{1,2} = -r_{1,2}^2 A_{1,2}. \quad (22)$$

При этом:

$$\Omega_{1,2} = \Omega + \frac{m_{1,2} A_{1,2} (1 + r_{1,2}^2)}{1 + \Omega^2}, \quad \Omega'_{1,2}(\Omega) = 1 - \frac{m_{1,2} A_{1,2} (1 + r_{1,2}^2)}{1 + \Omega^2} - \frac{2\Omega m_{1,2} A_{1,2} (1 + r_{1,2}^2)}{(1 + \Omega^2)^2}. \quad (23)$$

Если фазы излучения гиротронов совпадают, то для оптимальных фаз запаздывания $tg\theta_{1,2} = -r_{1,2}$. При оптимальной фазе запаздывания на графике зависимости частоты связанных колебаний (то есть частоты генерации) от частоты свободных колебаний появляется пологое плато, на котором частота меняется существенно меньше, чем в отсутствие связи. Необходимое условие

стабилизации частоты – это существенное превышение производной $\Omega'_{1,2}(\Omega)$ над единицей. Это условие выполняется при $m_{1,2}A_{1,2}(1+r_{1,2}^2) \gg 1$, или, поскольку значения параметров $|A_{1,2}|, |r_{1,2}| \sim 1$, при $m_{1,2} \gg 1$.

2. Исследование устойчивости состояний со стабильной частотой

Для исследования устойчивости предположим, что заданы малые возмущения стационарного состояния, так что:

$$\begin{aligned} y_{1,2} &= y_{01,2} + \tilde{y}_{01,2} + \varepsilon_{1,2} = \bar{y}_{01,2} + \varepsilon_{1,2}, |\varepsilon_{1,2}| \ll |\tilde{y}_{01,2}|, y_3 = y_{03} + \varepsilon_3, |\varepsilon_3| \ll y_{03}, \\ \varphi_{1,2,3} &= \Omega\tau + \varphi_{01,2,3} + \tilde{\varphi}_{1,2,3}, |\tilde{\varphi}_{1,2,3}| \ll 1 \end{aligned}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \kappa'_{1,2} &\approx \nu_{1,2}\tilde{y}_{01,2} + \nu_{1,2}\varepsilon_{1,2} = \bar{\kappa}'_{1,2} + \nu_{1,2}\varepsilon_{1,2}, \\ \kappa''_{1,2} &\approx -\Omega_{1,2} + \mu_{1,2}\tilde{y}_{01,2} + \mu_{1,2}\varepsilon_{1,2} = \bar{\kappa}''_{1,2} + \mu_{1,2}\varepsilon_{1,2}. \end{aligned} \quad (25)$$

Линеаризуя (14), (15) по малым возмущениям и задавая решение полученной системы уравнений как $\varepsilon_{1,2,3} = \bar{\varepsilon}_{1,2,3}e^{\lambda\tau}$, $\tilde{\varphi}_{1,2,3} = \bar{\varphi}_{1,2,3}e^{\lambda\tau}$, получим характеристическое уравнение в виде:

$$\begin{vmatrix} \lambda + \nu_1\bar{y}_{01} & -\Omega - \bar{\kappa}_1'' & -m_1 \cos(\theta_1 + \varphi_1) & -m_1 \sin(\theta_1 + \varphi_1) & 0 & 0 \\ \Omega + \mu_1\bar{y}_{01} & \lambda + \bar{\kappa}_1' & m_1 \sin(\theta_1 + \varphi_1) & -m_1 \cos(\theta_1 + \varphi_1) & 0 & 0 \\ -\cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & \lambda + 1 & -\Omega & -\cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 \\ -\sin \varphi_1 & -\cos \varphi_1 & \Omega & \lambda + 1 & -\sin \varphi_2 & -\cos \varphi_2 \\ 0 & 0 & -m_2 \cos(\theta_2 + \varphi_2) & -m_2 \sin(\theta_2 + \varphi_2) & \lambda + \nu_2\bar{y}_{02} & -\Omega - \bar{\kappa}_2'' \\ 0 & 0 & m_2 \sin(\theta_2 + \varphi_2) & -m_2 \cos(\theta_2 + \varphi_2) & \Omega + \mu_2\bar{y}_{02} & \lambda + \bar{\kappa}_2' \end{vmatrix} = 0 \quad (26)$$

Первые два корня характеристического уравнения имеют значения:

$$\lambda_{1,2} = -\nu_{1,2}\bar{y}_{01,2} < 0 \quad (27)$$

– это декременты, равные прочности предельного цикла каждого автогенератора в автономном режиме. С таким декрементом убывают возмущения амплитуды каждого гиротрона.

Следующие два корня при оптимальных фазах запаздывания равны:

$$\lambda_{3,4} = m_{1,2}A_{1,2} \frac{1+r_{1,2}^2}{1+\Omega^2}. \quad (28)$$

С таким декрементом, величина которого порядка коэффициентов связи, убывают возмущения фаз гиротронов. Внутри резонансной полосы ($|\Omega| < 1$):

$$y_{01,2}V_{1,2} \gg \frac{m_{1,2}A_{1,2}}{1 + \Omega^2}, \quad (29)$$

поэтому модули первых двух декрементов существенно больше, чем третьего и четвертого декрементов. Величины третьего и четвертого декрементов быстро убывают за пределами полосы внешнего резонатора (см. рис. 3).

Пятый декремент равен:

$$\lambda_5 = -2 + \frac{\cos \theta_1 - r_1 \sin \theta_1}{A_1(1 + r_1^2)}(1 + \Omega^2) + \frac{\cos \theta_2 - r_2 \sin \theta_2}{A_2(1 + r_2^2)}(1 + \Omega^2). \quad (30)$$

Как показывают дальнейшие численные расчеты, при стабилизации частоты гиротроны работают синхронно, то есть разность фаз $\Delta\varphi=0$. При этом:

$$\lambda_5 = \Omega^2 - 1, \quad (31)$$

то есть в интервале $\Omega \in [-1, 1]$, соответствующем узкой полосе внешнего резонатора, решение устойчиво. С таким декрементом убывают возмущения амплитуды и фазы внешнего резонатора. Шестой корень уравнения равен нулю и соответствует сдвигу начала отсчета времени.

Для декрементов выполняется неравенство $|\lambda_{1,2}| \gg |\lambda_{3,4}| \gg |\lambda_5|$.

Из определения коэффициентов связи и необходимого условия стабилизации частоты $m_{1,2} \gg 1$ следует, что стабилизация возможна при выполнении соотношения, аналогичного (2):

$$\frac{Q_{1,2}}{2Q_3} \ll |R_{1,2}| \ll 1. \quad (32)$$

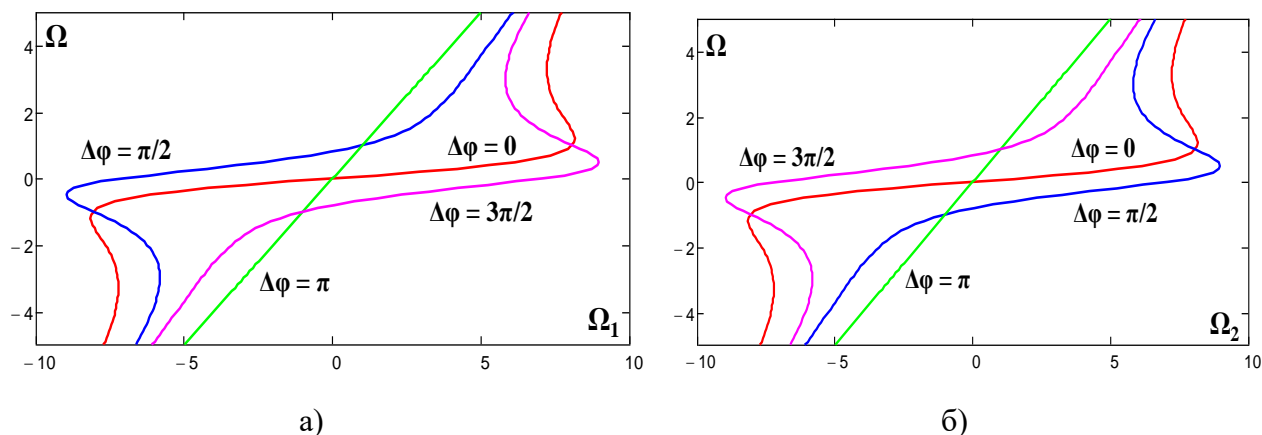


Рис. 3. Зависимости частоты генерации от собственной частоты первого (а) и второго (б) гиротронов, рассчитанные по формуле (16) при различных значениях разности фаз $\Delta\varphi$ и оптимальных фазах запаздывания $\theta_{1,2} = -\pi/4$

Заключение

Анализ стационарных состояний, в которых генераторы излучают когерентно, показывает, что частота излучения может быть стабилизирована, если добротность внешнего резонатора достаточно велика (см. (32)). При этом изменение параметров системы приводит к существенно меньшим изменениям частоты генерации Ω , чем в отсутствие отражений: в достаточно широком интервале параметров частота излучения гиротронов может удерживаться в пределах полосы внешнего резонатора. Характерный вид зависимостей частоты от собственной частоты резонансной системы для двух одинаковых генераторов показан на рис. 2,3.

При возрастании и убывании собственных частот резонаторов гиротронов может наблюдаться гистерезис и скачки частоты излучения.

Исследование устойчивости при оптимальной фазе запаздывания показывает, что стабилизированные по частоте состояния устойчивы. При малом отклонении от этих состояний быстрее всего убывают возмущения амплитуд гиротронов. На следующем этапе, за большее время происходит установление стационарных значений фаз гиротронов. На последнем, самом длительном этапе, за время порядка $2Q_3/\omega_3$ устанавливаются стационарные значения амплитуды и фазы внешнего резонатора.

При аналитическом рассмотрении остается невыясненным вопрос, как соотносятся фазы излучения в обоих гиротронах. Если предположить, что разность фаз ненулевая, то стабилизация частоты уменьшается или исчезает (рис. 3) даже при оптимальной фазе запаздывания. Однако, как показали численное моделирование уравнений двух гиротронов с отражением от внешнего высокочастотного резонатора (см. [22]), при стабилизации частоты гиротроны излучают когерентно с оптимальной разностью фаз.

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

Литература

1. Egorov S. V. et al. Implementation of rapid microwave sintering using a 24 GHz gyrotron system // Review of Scientific Instruments. – 2022. – Т. 93. – №. 6.
2. Thumm M. K. A. et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nuclear Fusion. – 2019. – Т. 59. – №. 7. – С. 073001.
3. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A., Petelin M. I. The gyrotron at 50: Historical overview // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2014. – Т. 35. – С. 325-381.
4. Denisov G. G. New trends in gyrotron development // EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 149. – С. 01001.
5. Jory H. Network for pulling a microwave generator to the frequency of its resonant load: пат. 3714592 США. – 1973.
6. Kozorezov G. G. Ferrite-decoupled magnetrons for electron accelerators // Vacuum Microwave Electronics: Collected Review Papers. – Institute of Applied Physics, 2002. – С. 67-70.
7. Kazakevitch G. M. et al. Stabilization of the microtron-injector for a wide-band compact FIR FEL // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2004. – Т. 528. – №. 1-2. – С. 115-119.

8. Li H., Abraham N. B. Analysis of the noise spectra of a laser diode with optical feedback from a high-finesse resonator // IEEE journal of quantum electronics. – 1989. – Т. 25. – №. 8. – С. 1782-1793.
9. Oraevsky A. N., Yarovitsky A. V., Velichansky V. L. Frequency stabilisation of a diode laser by a whispering-gallery mode // Quantum Electronics. – 2001. – Т. 31. – №. 10. – С. 897.
10. Liang W. et al. Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser // Nature communications. – 2015. – Т. 6. – №. 1. – С. 7371.
11. Zolotovskii I. O. et al. Frequency locking of a semiconductor laser by a ring fibre resonator // Quantum Electronics. – 2017. – Т. 47. – №. 10. – С. 871.
12. Seel S. et al. Cryogenic optical resonators: a new tool for laser frequency stabilization at the 1 Hz level // Physical review letters. – 1997. – Т. 78. – №. 25. – С. 4741.
13. 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.
14. 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.
15. Глявин М. Ю. и др. Стабилизация частоты гиротрона слабой отраженной волной // Известия вузов. Радиофизика. – 2015. – Т. 58. – №. 9.
16. Zotova I. V. et al. Time-domain theory of low-Q gyrotrons with frequency-dependent reflections of output radiation // Physics of Plasmas. – 2018. – Т. 25. – №. 1.
17. 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.
18. Komurasaki K., Tabata K. Development of a novel launch system microwave rocket powered by millimeter-wave discharge // International Journal of Aerospace Engineering. – 2018. – Т. 2018. – С. 1-9.

19. Rozental R. M. et al. Mutual synchronization of weakly coupled gyrotrons // *Physics of Plasmas*. – 2015. – Т. 22. – №. 9.
20. Адилова А. Б., Рыскин Н. М. Влияние запаздывания на взаимную синхронизацию двух связанных гиротронов // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2020. – Т. 63. – №. 9-10.
21. Adilova A. B., Ryskin N. M. Theory of peer-to-peer locking of high-power gyrotron oscillators coupled with delay // *Electronics*. – 2022. – Т. 11. – №. 5. – С. 811.
22. 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>

Для цитирования:

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 высокочастотного резонатора // *Журнал радиоэлектроники*. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.23>