



Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2021. Т. 29, № 6
Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Applied Nonlinear Dynamics. 2021;29(6)

Научная статья
УДК 621.385.69
DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-905-914

Исследование синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом на основе модифицированной квазилинейной теории

Н. В. Григорьева

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, Россия

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова РАН, Россия

E-mail: preobnv@gmail.com

Поступила в редакцию 07.05.2021, принята к публикации 19.07.2021,
опубликована 30.11.2021

Аннотация. *Тема.* Работа посвящена исследованию синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом. Теоретическое исследование процессов синхронизации гиротронов путем вычислительного эксперимента на основе тех или иных традиционных моделей сверхвысокочастотной электроники не дает полного описания картины синхронизации. Поэтому *целью* работы является построение модели, в которой полученная в результате численных расчетов функция электронной восприимчивости аппроксимируется рациональными функциями. *Метод.* Развита модель позволяет проводить бифуркационный анализ процессов синхронизации. На ее основе определены стационарные состояния и проведен анализ их устойчивости. Результаты хорошо согласуются с численным моделированием на основе нестационарной теории гиротрона с фиксированной гауссовой структурой высокочастотного поля. *Результаты и обсуждение.* Построены резонансные кривые и области синхронизации на плоскости параметров «амплитуда – частота внешнего сигнала». Рассмотрен случай, когда гиротрон находится в режиме жесткого возбуждения, поскольку максимальный КПД достигается, как правило, именно в режиме жесткого возбуждения. В целом результаты качественно согласуются с картиной, описанной ранее для более простой квазилинейной модели генератора с жестким возбуждением, в случае достаточно сильной неизохронности.

Ключевые слова: гиротрон, жесткое возбуждение, синхронизация, внешний сигнал, численное моделирование.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00307). Автор благодарит научного руководителя Н. М. Рыскина за всестороннюю поддержку и проявленное внимание к данной работе.

Для цитирования: Григорьева Н. В. Исследование синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом на основе модифицированной квазилинейной теории // Известия вузов. ПНД. 2021. Т. 29, № 6. С. 905–914.
DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-905-914

Статья опубликована на условиях Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Study of gyrotron synchronization by an external harmonic signal based on a modified quasi-linear theory

N. V. Grigorieva

Saratov State University, Russia
Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Russia
E-mail: preobnv@gmail.com

Received 07.05.2021, accepted 19.07.2021, published 30.11.2021

Abstract. *Topic.* The paper is devoted to the study of synchronization of a gyrotron by an external harmonic signal. A theoretical study of gyrotron synchronization processes by means of a computational experiment based on certain traditional models of microwave electronics does not provide a complete description of the synchronization pattern. Therefore, the *goal* of the paper is to develop a modified quasi-linear model based on an approximation of the electron susceptibility by rational functions. *Methods.* The developed model allows for bifurcation analysis of synchronization processes. On its basis, stationary states are determined and their stability analysis is carried out. The results are in good agreement with numerical simulation based on the non-stationary theory of a gyrotron with a fixed Gaussian high-frequency field structure. *Results and discussion.* Resonance curves and synchronization bounds are built on the plane of parameters “amplitude – frequency of external signal”. The case where the gyrotron is in the hard excitation mode is considered, since the maximum efficiency is usually achieved in the hard excitation mode. In general, the results are in qualitative agreement with the picture described earlier for a simpler quasi-linear model of a oscillator with hard excitation, in the case of a sufficiently strong phase nonlinearity.

Keywords: gyrotron, hard excitation, synchronization, external signal, numerical simulation.

Acknowledgements. This work is supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-79-00307). The author thanks his scientific advisor N. M. Ryskin for all-round support and attention to this work.

For citation: Grigorieva NV. Study of gyrotron synchronization by an external harmonic signal based on a modified quasi-linear theory. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2021;29(6):905–914.
DOI: 10.18500/0869-6632-2021-29-6-905-914

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0).

Введение

Синхронизация является одним из фундаментальных нелинейных явлений, которое находит широкое практическое применение [1]. В частности, в радиотехнике для управления частотой мощного электронного генератора используется захват частоты внешним сигналом маломощного вспомогательного генератора, для которого обеспечить стабильность частоты технически гораздо проще.

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных проблем сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники является освоение коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевый, ТГц) диапазона. Одним из мощных источников ТГц-излучения являются мазеры на циклотронном резонансе – гиротроны [2]. Задача о синхронизации гиротрона внешним гармоническим сигналом в последнее время привлекла большое внимание в связи с активным развитием исследований в области управляемого термоядерного синтеза, где гиротрон используется для электронно-циклотронного нагрева плазмы [3]. Приоритетными вопросами являются обеспечение одномодовой генерации с высоким КПД и стабилизация частоты излучения гиротрона. В связи с этим в последние годы возросло число работ, посвященных как теоретическим [4, 6, 7], так и экспериментальным [8, 9] исследованиям синхронизации гиротронов внешним сигналом.

Однако теоретическое исследование процессов синхронизации гиротронов путем вычислительного эксперимента на основе тех или иных традиционных моделей СВЧ-электроники

не дает полного описания картины синхронизации. В частности, затруднительно выявить структуру областей синхронизации в пространстве управляющих параметров и провести бифуркационный анализ механизмов перехода в режим синхронизации. Поэтому исследование фундаментальных закономерностей синхронизации гиротрона при помощи методов теории колебаний и нелинейной динамики представляет очевидный интерес.

Существует подход, основанный на так называемой квазилинейной теории [2, 10], который допускает приближенное аналитическое исследование автоколебаний в гиротроне с фиксированной структурой высокочастотного (ВЧ) поля. В рамках квазилинейной теории можно получить выражение для комплексной электронной восприимчивости в виде ряда по степеням амплитуды. Однако такой подход является приближенным и может дать лишь качественную картину поведения генератора. В работе [11] была предложена модифицированная квазилинейная модель гиротрона, основанная на аппроксимации комплексной электронной восприимчивости в виде рациональных функций. Развита в [11] модель позволяет получить результаты, не только качественно, но и количественно согласующиеся с более строгой математической моделью теории с фиксированной структурой ВЧ-поля. Основное преимущество такого подхода в том, что он позволяет построить достаточно полную картину динамических режимов, в том числе, с применением современных автоматизированных пакетов бифуркационного анализа.

В данной работе на основе модифицированной квазилинейной модели гиротрона, синхронизируемого внешним сигналом, проведено теоретическое исследование сценариев перехода в режим синхронизации. Рассматривается ситуация, когда автономный гиротрон находится в режиме жесткого возбуждения, поскольку при этом обеспечивается максимальный КПД генерации [2]. С помощью данной модели аналитически найдены условия устойчивости режимов синхронизации.

1. Модель и основные уравнения

Гиротрон представляет собой мазер на электронном циклотронном резонансе, который генерирует СВЧ электромагнитное излучение за счет вынужденного циклотронного излучения электронов, вращающихся в сильном магнитном поле. Для моделирования мы используем известные уравнения нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ-поля [2, 5–11]. Это приближение справедливо при достаточно высокой добротности резонатора гиротрона, когда $\omega_0/Q \ll \Delta\Omega$, где ω_0/Q – ширина резонансной кривой (Q – добротность резонатора), $\Delta\Omega = 2\pi/T_t$ – ширина полосы циклотронного резонанса, обратно пропорциональная времени пролета электронов через пространство взаимодействия T_t . Например, согласно [5] при типичных параметрах гиротрона для УТС $\omega_0/Q = 8 \cdot 10^8$ рад/с, $\Delta\Omega = 3.8 \cdot 10^{10}$ рад/с

$$\begin{aligned} \frac{dp}{d\zeta} + i \left(\Delta_H + |p|^2 - 1 \right) p &= iA(\tau) f_s(\zeta), \\ p(\zeta = 0) &= e^{i\varphi_0}, \quad \varphi_0 \in [0, 2\pi]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь p – безразмерный поперечный импульс, $\zeta = \beta_{\perp}^2 \omega_0 z / (2\beta_{\parallel} c)$ – безразмерная продольная координата, $\beta_{\parallel} = v_{\parallel 0}/c$, $\beta_{\perp} = v_{\perp 0}/c$, $\Delta_H = 2(\omega_0 - \omega_H)/(\beta_{\perp}^2 \omega_0)$ – расстройка циклотронного резонанса, ω_H – циклотронная частота, ω_0 – опорная частота, которую выберем равной собственной частоте «холодного» резонатора, $A(\tau)$ – медленно меняющаяся безразмерная амплитуда колебаний в резонаторе. Функция $f_s(\zeta)$ описывает распределение поля в резонаторе. Выберем ее в виде гауссовой функции

$$f_s(\zeta) = \exp \left[-3 \left(\frac{2\zeta}{\zeta_k} - 1 \right)^2 \right]. \quad (2)$$

Такая зависимость часто используется при теоретическом анализе гиротронов [2, 6, 10, 11].

Амплитуда колебаний поля в резонаторе A подчиняется уравнению возбуждения, которое можно записать в виде

$$\frac{dA}{d\tau} + A = iI_0\Phi A, \quad (3)$$

где $\tau = (\omega_0 t)/(2Q)$ – безразмерное время, Q – добротность резонатора, I_0 – безразмерный параметр тока (подробнее см. [2, 6]), $\Phi = \Phi' + i\Phi''$ – так называемая комплексная электронная восприимчивость, которая определяется следующим образом:

$$\Phi = \frac{i}{A} \int_0^{\zeta_k} \left(\int_0^{2\pi} p(\zeta, \varphi_0) d\varphi_0 \right) f_s^*(\zeta) d\zeta. \quad (4)$$

Решая уравнения движения (1) при постоянном значении амплитуды A_0 , которую без ограничения общности можно считать вещественной, можно определить зависимости активной и реактивной частей комплексной восприимчивости от амплитуды. На рис. 1 приведены графики $\Phi'(A_0)$ и $\Phi''(A_0)$ при $\mu = 15.0$ ($\mu = \zeta_k/\sqrt{3}$ – безразмерный параметр, определяющий ширину распределения ВЧ-поля по уровню e^{-1}) и различных значениях расстройки циклотронного резонанса.

Анализируя стационарные решения уравнения (3) на устойчивость, нетрудно показать, что состояния, для которых $d\Phi'/dA_0 < 0$, являются устойчивыми, а те, для которых $d\Phi'/dA_0 > 0$ – неустойчивыми. Они показаны на рис. 1 сплошными и пунктирными линиями, соответственно. Неустойчивые стационарные состояния возникают при $\Delta_H \geq \Delta_c \approx 0.22$. Это свидетельствует о том, что имеет место жесткое возбуждение автоколебаний. При этом нулевое состояние остается устойчивым, а возбуждение колебаний начинается при достаточно большом начальном значении амплитуды, превышающем амплитуду неустойчивого состояния. При значениях $\Delta_H < \Delta_c$ колебания в генераторе возбуждаются мягко.

Следуя [11], для зависимостей $\Phi'(|A_0|^2)$ и $\Phi''(|A_0|^2)$ можно подобрать достаточно простые аналитические аппроксимации в виде рациональных функций

$$\Phi'(|A_0|^2) = \frac{\sum_{k=0}^n \alpha'_k |A_0|^{2k}}{1 + \sum_{k=1}^n \beta'_k |A_0|^{2k}}, \quad \Phi''(|A_0|^2) = \frac{\sum_{k=0}^n \alpha''_k |A_0|^{2k}}{1 + \sum_{k=1}^n \beta''_k |A_0|^{2k}}. \quad (5)$$

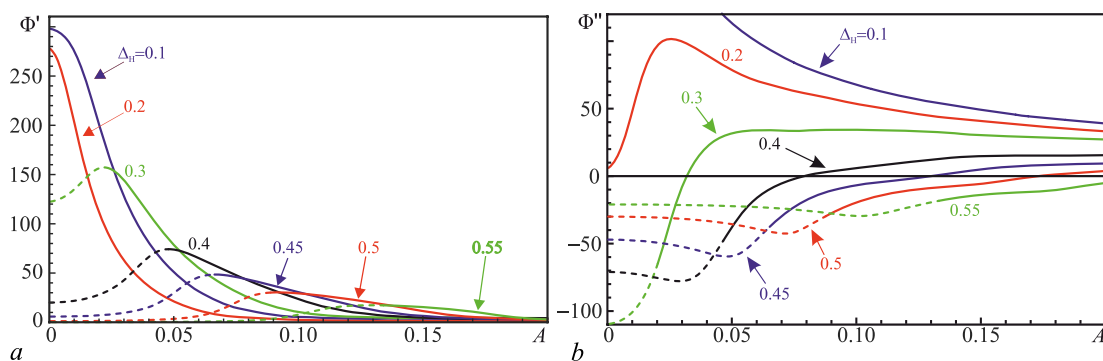


Рис. 1. Зависимости активной (а) и реактивной (б) частей электронной функции восприимчивости от амплитуды при $\mu = 15.0$ и различных значениях параметра циклотронной расстройки Δ_H . Устойчивые и неустойчивые состояния показаны сплошными и пунктирными линиями, соответственно

Fig. 1. Active (a) and reactive (b) parts of the electronic susceptibility as functions on the amplitude at $\mu = 15.0$ and different values of the cyclotron resonance mismatch Δ_H . Stable and unstable states are shown with solid and dashed lines, respectively

Выберем в качестве характерного примера значения параметров $\Delta_H = 0.5$ и $\mu = 15.0$, где $\mu = \zeta_k/\sqrt{3}$ – безразмерный параметр, характеризующий длину резонатора. Как известно, в гиротроне с гауссовой структурой поля оптимальное значение КПД $\eta \approx 0.7$ достигается при $\Delta_H = 0.53$, $\mu = 15.0$, $I_0 = 0.06$ [2, 6]. Однако эти значения параметров лежат вблизи границы срыва генерации (см. [6]), поэтому значение расстройки выбрано несколько меньшим оптимального. В этом случае при $I_0 = 0.045$ достигается максимальный КПД $\eta \approx 0.68$, что незначительно меньше оптимального значения.

Рассчитанные численно зависимости $\Phi'(A_0)$ и $\Phi''(A_0)$ хорошо аппроксимируются функциями вида (5) при $k = 5$. Коэффициенты α'_0 и α''_0 , очевидно, должны совпадать с активной и реактивной составляющими линейной восприимчивости $\Phi_0 = \Phi(A \rightarrow 0)$, которую можно определить из линейной теории гиротрона [2]. В частности, для гауссова распределения поля (2) при выбранных значениях параметров имеем $\Phi_0 \approx 1.1385 - 30.8711 \cdot i$. Остальные значения коэффициентов в (5) определялись численно с помощью программного пакета Wolfram Mathematica. Приведенные в Таблице значения коэффициентов при $k = 6$ обеспечивают достаточно высокую точность аппроксимации (рис. 2)

Таблица. Коэффициенты аппроксимирующих функций (5) при $\Delta_H = 0.5$ и $\mu = 15.0$

Table. Coefficients of the approximating functions (5) at $\Delta_H = 0.5$ and $\mu = 15.0$

k	α'_k	β'_k	α''_k	β''_k
0	1.1385	–	–30.8711	–
1	–51.3858	–525.289	$1.11459 \cdot 10^4$	–415.609
2	$-7.06454 \cdot 10^4$	$1.17970 \cdot 10^5$	$-1.66048 \cdot 10^6$	$7.42605 \cdot 10^4$
3	$1.9954 \cdot 10^7$	$-1.4157 \cdot 10^7$	$9.64885 \cdot 10^7$	$-7.20069 \cdot 10^6$
4	$-1.30631 \cdot 10^9$	$9.76376 \cdot 10^8$	$-1.23068 \cdot 10^9$	$4.90329 \cdot 10^8$
5	$3.38298 \cdot 10^{10}$	$-3.57958 \cdot 10^{10}$	$-7.91135 \cdot 10^{10}$	$-1.9856 \cdot 10^{10}$
6	$-9.31965 \cdot 10^{10}$	$5.55315 \cdot 10^{11}$	$2.015 \cdot 10^{12}$	$3.57911 \cdot 10^{11}$

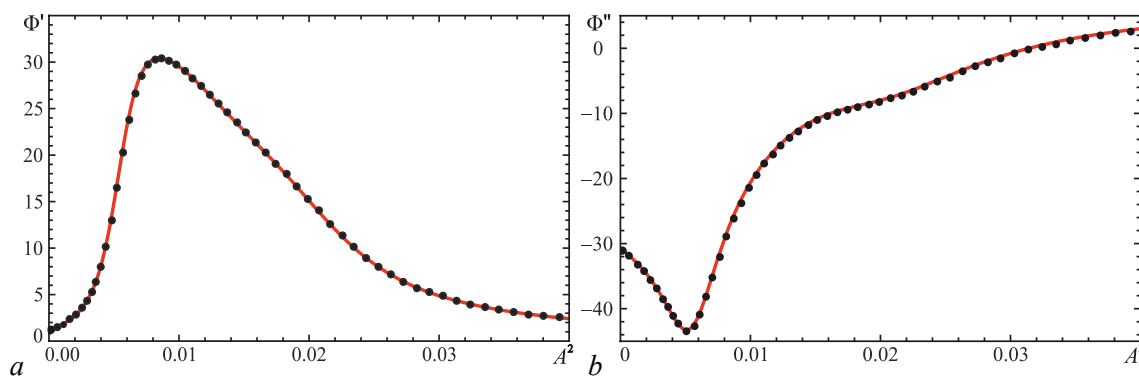


Рис. 2. Зависимости активной (a) и реактивной (b) частей электронной функции восприимчивости от амплитуды при $\mu = 15.0$ и $\Delta_H = 0.5$. Круги – результаты численного моделирования, сплошные линии – аппроксимация по формуле (5)

Fig. 2. Dependences of the active (a) and reactive (b) parts of the electronic susceptibility function on the amplitude at $\mu = 15.0$ and $\Delta_H = 0.5$. Circles are the numerical simulation results, solid lines are the approximation results by the formula (5)

2. Результаты и обсуждение

С учетом влияния внешнего сигнала уравнение возбуждения (3) можно записать в виде (см., например, [6, 7, 12])

$$\frac{dA}{d\tau} + A = I_0 \Phi(|A|^2) A + 2f e^{i\Omega\tau}. \quad (6)$$

Здесь f – амплитуда внешнего сигнала, а Ω – безразмерная расстройка между частотой внешнего сигнала и опорной частотой ω_0 . Отметим, что при выбранной нормировке амплитуды внешнего сигнала $f/A \approx \sqrt{P_{\text{in}}/P_{\text{out}}}$, где P_{in} – мощность внешнего сигнала, P_{out} – выходная мощность гиротрона [4, 12]. Сделав замену $A \rightarrow A \exp(i\Omega\tau)$, можно привести (6) к автономному виду

$$\frac{dA}{d\tau} + (1 + i\Omega) A = I_0 \Phi(|A|^2) A + 2f. \quad (7)$$

Если разделить комплексное уравнение (7) на уравнения для вещественных амплитуды и фазы, полагая $A = a \exp(i\varphi)$, получим

$$\begin{aligned} \frac{da}{d\tau} + a &= I_0 \Phi'(a^2) a + 2f \cos \varphi, \\ \frac{d\varphi}{d\tau} + \Omega &= I_0 \Phi''(a^2) - \frac{2f}{a} \sin \varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Неподвижные точки системы (8) $a = a_0$, $\varphi = \varphi_0$ соответствуют режимам синхронизации. Для них нетрудно получить соотношение, позволяющее определить амплитуду колебаний как функцию амплитуды и частоты внешнего воздействия, то есть уравнение резонансных кривых [12]:

$$\left[(1 - I_0 \Phi'(a_0^2))^2 + (\Omega - I_0 \Phi''(a_0^2))^2 \right] a_0^2 = 4f^2. \quad (9)$$

Также можно найти условия устойчивости режима синхронизации. Задавая малое возмущение стационарного решения $a = a_0 + \tilde{a}$, $\varphi = \varphi_0 + \tilde{\varphi}$, подставляя в уравнения (8) и проделывая стандартную процедуру линеаризации, придем к характеристическому уравнению, которому можно придать вид

$$p^2 + 2kp + n = 0. \quad (10)$$

Здесь введены обозначения

$$k = 1 - I_0 \Phi'(a_0^2) - I_0 \frac{\partial \Phi'(a_0^2)}{\partial a_0^2} a_0^2, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} n = & \left[1 - I_0 \Phi'(a_0^2) - I_0 \frac{\partial \Phi'(a_0^2)}{\partial a_0^2} a_0^2 \right]^2 + \left[\Omega - I_0 \Phi''(a_0^2) - I_0 \frac{\partial \Phi''(a_0^2)}{\partial a_0^2} a_0^2 \right]^2 - \\ & - I_0^2 \left[\left(\frac{\partial \Phi'(a_0^2)}{\partial a_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi''(a_0^2)}{\partial a_0^2} \right)^2 \right] a_0^4. \end{aligned} \quad (12)$$

Согласно критерию Рауса–Гурвица (см., например, [13]), условия устойчивости неподвижной точки в случае характеристического уравнения (10) имеют вид

$$k > 0, \quad n > 0. \quad (13)$$

Первое из этих условий задает границу бифуркации Андронова–Хопфа, то есть бифуркации рождения предельного цикла из неподвижной точки. Очевидно, что на плоскости (Ω, a_0) данная граница представляет собой горизонтальную прямую. Второе условие задает границу седлоузловой бифуркации. В контексте задачи о синхронизации генератора внешним гармоническим сигналом эти бифуркации соответствуют известным механизмам подавления (гашения) и захвата частоты [14].

На рис. 3, а построены резонансные кривые для значения нормированного тока $I_0=0.04$. Точки смыкания резонансных кривых, которые показаны белыми кружками, максимумы резонансных кривых и неподвижные точки автономной системы, определяемые из (9) при условии $f = 0$, лежат на так называемой скелетной кривой $\Omega = I_0\Phi''(a_0^2)$. Она показана на рис. 3, а зеленым пунктиром. Неподвижные точки системы показаны черными кружками. Они отвечают неустойчивому и устойчивому предельным циклам автономного генератора.

При малых f резонансные кривые состоят из трех ветвей: нижняя ветвь лежит вблизи горизонтальной оси, верхние ветви охватывают неподвижные точки. При увеличении f вначале при $f \approx 0.01$ соединяются две верхние ветви, затем при $f \approx 0.023$ они смыкаются с нижней ветвью.

Также на рис. 3, а нанесены границы области устойчивости, на которых выполняются условия седлоузловой бифуркации (SN) и бифуркации Андронова–Хопфа (AH). Первая из них представляет собой замкнутую кривую, которая проходит через точки, соответствующие автономным колебаниям, и точки смыкания ветвей резонансных кривых. Граница бифуркации Андронова–Хопфа представляет собой две горизонтальные прямые. Область неустойчивых состояний на рис. 3, а закрашена серым цветом. Поскольку в автономной системе имеется два предельных цикла, в данном случае возможны по две бифуркации того и другого типа. Индексы 1 и 2 относятся к бифуркациям устойчивого и неустойчивого предельных циклов, соответственно. Таким образом, имеются две области устойчивых стационарных состояний. Верхняя область соответствует режимам синхронизации, а нижняя – режимам вынужденных колебаний. Такая картина полностью согласуется с результатами работы [15], где рассматривалась синхронизация

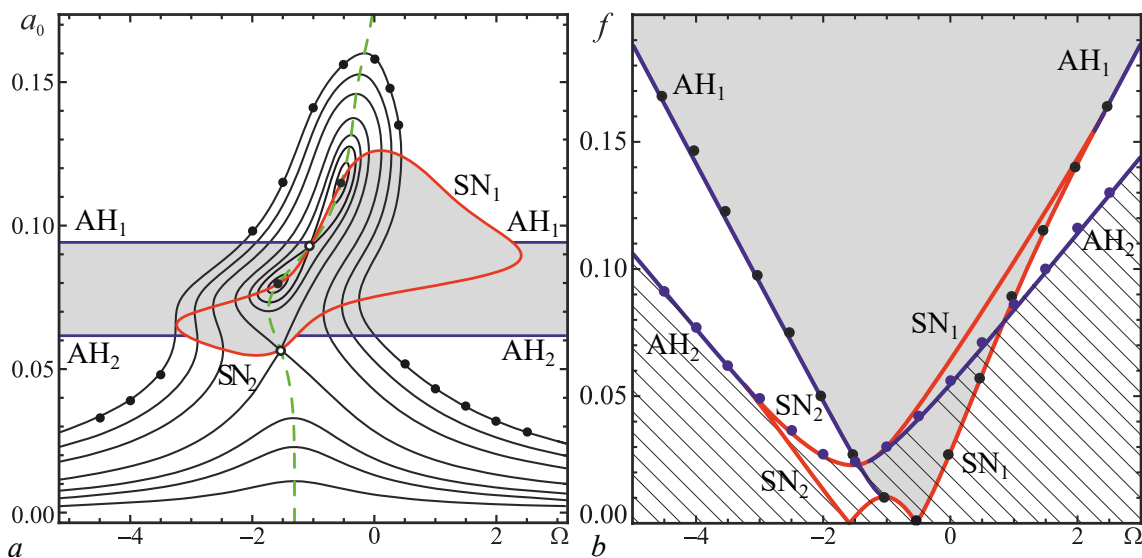


Рис. 3. Резонансные кривые (а) и языки синхронизации (b) при $I_0 = 0.04$, $\Delta_H = 0.5$, $\mu = 15.0$. Кружками показаны результаты численного моделирования по уравнениям (1) и (4)

Fig. 3. Resonance curves (a) and synchronization tongues (b) for $I_0 = 0.04$, $\Delta_H = 0.5$, $\mu = 15.0$. Circles show the results of numerical simulation using the equations (1) and (4)

упрощенной квазилинейной модели генератора с жестким возбуждением. Поскольку в автономной системе тривиальное состояние с нулевой амплитудой является устойчивым, при подаче в резонатор внешнего сигнала оно эволюционирует в режим вынужденных колебаний с малой амплитудой.

На рис. 3, *b* бифуркационные линии построены на плоскости параметров внешнего сигнала. Граница седлоузловой бифуркации имеет вид двух языков, которые опираются на горизонтальную ось в точках, соответствующих частотам колебаний устойчивого и неустойчивого цикла. Область синхронизации, которая на рис. 3, *b* закрашена серым, ограничена линиями SN_1 и AN_1 . Она соответствует границе верхней устойчивой области на рис. 3, *a*. Линии SN_2 и AN_2 ограничивают сверху область вынужденных колебаний, которая на рис. 3, *b* заштрихована. Они соответствуют границе нижней устойчивой области на резонансных кривых (см. рис. 3, *a*). В целом картина, представленная на рис. 3, аналогична описанной в работе [15] в случае достаточно большой неизохронности.

Отметим, что теоретические результаты полностью согласуются с результатами численного моделирования при помощи нестационарной теории гиротрона с фиксированной структурой поля (уравнения (1), (2) и (4)). На рис. 3 численные результаты показаны кружками.

Заключение

В данной работе представлена модифицированная квазилинейная модель гиротрона, в которой используется аппроксимация рассчитанных численно функций активной и реактивной восприимчивости в виде (5). Модель позволяет проводить подробный бифуркационный анализ процессов синхронизации внешним гармоническим сигналом. Показано, что в случае жесткого возбуждения наблюдается мультистабильность: наряду с режимами синхронизации имеются режимы вынужденных колебаний, амплитуда которых мала. Режим синхронизации с высоким КПД устанавливается, если амплитуда начального возмущения достаточно велика. Бифуркационные сценарии перехода в синхронный режим соответствуют известным механизмам подавления (гашения) и захвата частоты. Результаты, полученные с помощью модифицированной квазилинейной модели, хорошо согласуются с численным моделированием на основе теории гиротрона с фиксированной структурой ВЧ-поля.

Список литературы

1. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. 496 с.
2. Nusinovich G. S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2004. 352 p. DOI: 10.1353/book.62236.
3. Thumm M. Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, no. 3. P. 590–599. DOI: 10.1109/TPS.2013.2284026.
4. 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 // Известия вузов. ПНД. 2017. Т. 25, № 1. С. 4–34. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-1-5-34.
5. Бакунин В. Л., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В., Фокин А. П. Влияние конкуренции мод на режим захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8–9. С. 709–720.
6. Григорьева Н. В., Рыскин Н. М., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В., Глявин М. Ю., Бакунин В. Л. Динамика многомодовых процессов на фронте импульса ускоряющего напряжения в гиротроне при воздействии внешнего сигнала // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 5–6. С. 422–433.

7. *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. P. 777–780. DOI: 10.1109/LED.2020.2980218.
8. *Бакунин В. Л., Гузнов Ю. А., Денисов Г. Г., Зайцев Н. И., Запезалов С. А., Куфтин А. Н., Новожилова Ю. В., Фокин А. П., Чирков А. В., Шевченко А. С.* Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности // *Письма в ЖТФ.* 2018. Т. 44, № 11. С. 38–45. DOI: 10.21883/PJTF.2018.11.46195.17109.
9. *Бакунин В. Л., Гузнов Ю. М., Денисов Г. Г., Зайцев Н. И., Запезалов С. А., Куфтин А. Н., Новожилова Ю. В., Фокин А. П., Чирков А. В., Шевченко А. С.* Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2019. Т. 62, № 7–8. С. 539–548.
10. *Моисеев М. А., Нусинович Г. С.* К теории многомодовой генерации в гиромонотроне // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1974. Т. 17, № 11. С. 1709–1717.
11. *Адилова А. Б., Рыскин Н. М.* Исследование синхронизации в системе двух гиротронов с запаздыванием в канале связи на основе модифицированной квазилинейной модели // *Известия вузов. ПНД.* 2018. Т. 26, № 6. С. 68–81. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-6-68-81.
12. *Ергаков В. С., Моисеев М. А., Хижняк В. И.* К теории синхронизации МЦР-монотрона // *Радиотехника и электроника.* 1978. Т. 23, № 12. С. 2591–2599.
13. *Трубецков Д. И., Рожнев А. Г.* Линейные колебания и волны. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 416 с.
14. *Кузнецов А. П., Кузнецов С. П., Рыскин Н. М.* Нелинейные колебания. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 292 с.
15. *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. P. 113107. DOI: 10.1063/1.4935847.

References

1. *Pikovsky A, Rosenblum M, Kurths J.* Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences. Cambridge: Cambridge University Press; 2001. 411 p. DOI: 10.1017/CBO9780511755743.
2. *Nusinovich GS.* Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: Johns Hopkins University Press; 2004. 352 p. DOI: 10.1353/book.62236.
3. *Thumm M.* Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014;42(3):590–599. DOI: 10.1109/TPS.2013.2284026.
4. *Novozhilova JV, Denisov GG, Glyavin MY, Ryskin NM, Bakunin VL, Bogdashov AA, Melnikova MM, Fokin AP.* Gyrotron frequency stabilization under the influence of external monochromatic signal or wave reflected from the load: review. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics.* 2017;25(1):4–34 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-1-5-34.
5. *Bakunin VL, Denisov GG, Novozhilova YV, Fokin AP.* Mode competition effect on frequency locking of a multimode gyrotron by a monochromatic external signal. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2017;59(8–9):638–647. DOI: 10.1007/s11141-017-9730-1.
6. *Grigorieva NV, Ryskin NM, Denisov GG, Novozhilova YV, Glyavin MY, Bakunin VL.* Dynamics of multimode processes at the leading edge of the accelerating-voltage pulse in a gyrotron driven by an external signal. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2020;63(5–6):381–391. DOI: 10.1007/s11141-021-10063-1.
7. *Bakunin VL, Denisov GG, Novozhilova YV.* Principal enhancement of THz-range gyrotron parameters using injection locking. *IEEE Electron Device Lett.* 2020;41(5):777–780. DOI: 10.1109/LED.2020.2980218.
8. *Bakunin VL, Guznov YA, Denisov GG, Zaitsev NI, Zapevalov SA, Kuftin AN, Novozhilova YV, Fokin AP, Chirkov AV, Shevchenko AS.* An experimental study of the influence of an external

signal on the generation mode of a megawatt-power gyrotron. Tech. Phys. Lett. 2018;44(6): 473–475. DOI: 10.1134/S1063785018060020.

9. Bakunin VL, Guznov YM, Denisov GG, Zaitsev NI, Zapevalov SA, Kuftin AN, Novozhilova YV, Fokin AP, Chirkov AV, Shevchenko AS. An experimental study of the external-signal influence on the oscillation regime of a megawatt gyrotron. Radiophysics and Quantum Electronics. 2019; 62(7–8):481–489. DOI: 10.1007/s11141-020-09994-y.
10. Moiseev MA, Nusinovich GS. Concerning the theory of multimode oscillation in a gyromonotron. Radiophysics and Quantum Electronics. 1974;17(11):1305–1311. DOI: 10.1007/BF01042032.
11. Adilova AB, Ryskin NM. Study of synchronization in the system of two delay-coupled gyrotrons using a modified quasilinear model. Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics. 2018;26(6): 68–81 (in Russian). DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-6-68-81.
12. Ergakov VS, Moiseev MA, Khizhniak VI. Theory of MCR monotron synchronization. Radio Engineering and Electronic Physics. 1978;23(12):92–98.
13. Trubetskov DI, Rozhnev AG. Linear Oscillations and Waves. Moscow: FIZMATLIT; 2001. 416 p. (in Russian).
14. Kuznetsov AP, Kuznetsov SP, Ryskin NM. Nonlinear Oscillations. Moscow: FIZMATLIT; 2005. 292 p. (in Russian).
15. Yakunina KA, Kuznetsov AP, Ryskin NM. Injection locking of an electronic maser in the hard excitation mode. Phys. Plasmas. 2015;22(11):113107. DOI: 10.1063/1.4935847.



Григорьева Наталья Вадимовна – родилась в Саратове (1996). Окончила Лицей прикладных наук (2014) и поступила на факультет нелинейных процессов. Окончила с отличием магистратуру Саратовского государственного университета (2020) и поступила в аспирантуру факультета нелинейных процессов СГУ. С 2019 года работает на должности стажера-исследователя в Саратовском филиале ИРЭ РАН. Автор статей в журналах, входящих в перечень ВАК и Web of Science, участник международных и всероссийских конференций. Победитель степиндиальной программы им. Владимира Потанина. Стипендиат Правительства РФ.

Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского
Россия, 410019 Саратов, Зелёная, 38
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
имени В. А. Котельникова РАН
E-mail: preobnv@gmail.com
AuthorID: 1075985