

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.11>

УДК: 621.385.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СВЯЗАННЫХ ГИРОТРОНОВ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Розенталь Р.М., Сергеев А.С.

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

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2024 г.

**Аннотация.** Для исследования задачи взаимной синхронизации двух связанных гиротронов диапазона 170 ГГц построена модель в рамках метода крупных частиц. Для снижения времени расчетов использован подход, основанный на замене несимметричной рабочей моды на эквивалентную осесимметричную моду. В результате размерность задачи снижается, и вместо трехмерного моделирования может быть использовано 2.5-мерное. Рассмотрен предельный случай, когда в качестве эквивалентной моды выбирается низшая осесимметричная мода круглого волновода  $TE_{01}$ . Продемонстрировано хорошее соответствие полученных результатов с традиционным подходом на основе моделирования усредненных уравнений.

**Ключевые слова:** гиротрон, связанные генераторы, метод крупных частиц.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке РФФ, грант №19-79-30071.

**Автор для переписки:** Розенталь Роман Маркович, [rrz@ipfran.ru](mailto:rrz@ipfran.ru)

## Введение

Задача синхронизации мощных источников СВЧ излучения, основанных на отборе энергии у электронных потоков, движущихся в вакууме, представляет значительный интерес в силу известных ограничений на мощность единичных источников. Подобные ограничения, к примеру, могут быть связаны с развитием процессов высокочастотного пробоя [1-6]. В качестве еще одной проблемы можно выделить трудности повышения энергетических характеристик электронных потоков (начальной энергии электронов и полного тока пучка) при сохранении высокой эффективности электронно-волнового взаимодействия. Задача сложения мощности нескольких источников относительно просто решается в случае использования усилительных схем, где путем подстройки фазы излучения на входе усилителей можно обеспечить когерентное сложение мощных выходных сигналов [7,8]. При использовании нескольких генераторов требуется обеспечить условия их синхронизации. Широко распространенным подходом является синхронизация внешним источником излучения [9-11]. Для короткоимпульсных источников может быть использован подход, при котором обеспечивается точная синхронизация электронных импульсов, вследствие чего удается обеспечить фазировку выходного излучения от нескольких независимых мощных генераторов [12,13]. Наконец, еще одним направлением является возможность взаимной синхронизации нескольких связанных генераторов [14-17].

В настоящее время ведется интенсивная разработка гиротронных комплексов для нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза [18]. Подобные комплексы включают большое число единичных гиротронов. В существующих проектах фазовая и частотная синхронизация отдельных генераторов не предусмотрена. Тем не менее, в ряде случаев подобная синхронизация является желательной. Очевидно, с общефизической точки зрения [19-21] такая синхронизация возможна через организацию дополнительной взаимной связи гиротронов.

Существуют различные методы решения задачи синхронизации гиротронов, использующие те или иные приближенные подходы. В то же время, наиболее полное исследование такой задачи может быть основано на трехмерном моделировании методом крупных частиц (particle-in-cell, PIC). Однако такое моделирование, в силу высоких индексов рабочих мод гиротронов, требует больших вычислительных затрат. В то же время, существует категория задач, для которых (по крайней мере в определенной области параметров) не требуется анализ многомодового взаимодействия в гиротронах. К таким задачам можно отнести захват гиротрона внешним сигналом [22-24], стабилизацию частоты гиротрона за счет отражений от резонансной [25,26] и нерезонансной нагрузки [27,28], синхронизацию связанных гиротронов [29,30], перестройку частоты генерации за счет возбуждения продольных мод с большим числом продольных вариаций [31,31]. В недавних работах [33,34] для решения одномодовых задач был предложен метод ускорения расчетов электронно-волнового взаимодействия в гиротронах за счет подбора эквивалентной осесимметричной рабочей моды, когда можно использовать 2.5-мерные PIC-модели, учитывающие все компоненты полей и импульсов частиц, которые считаются независимыми от азимутальной координаты [35-37]. Очевидно, что скорость расчетов на основе 2.5D PIC-моделей существенно больше по сравнению с 3D моделями. В данной работе с использованием такого подхода построена эквивалентная модель двух связанных гиротронов диапазона 170 ГГц и проведено PIC моделирование процессов их взаимной синхронизации. Выполнено сравнение с традиционным моделированием в рамках усредненных уравнений, показавшее хорошее совпадение полученных результатов.

## 1. Моделирование динамики связанных гиротронов на основе метода крупных частиц

Исследуем задачу о взаимной синхронизации двух гиротронов, в каждом из которых имеет место взаимодействие винтового электронного потока с единственной  $TE_{m,p}$  модой электродинамической системы. Будем рассматривать гиротрон мегаваттного уровня мощности диапазона 170 ГГц с рабочей модой  $TE_{28,12}$  [38]. Как было отмечено в [33,34], при моделировании на основе усредненных уравнений можно осуществить замену рабочей моды несимметричного типа на эквивалентную осесимметричную моду, произведя соответствующую коррекцию величины тока пучка таким образом, чтобы сохранить неизменным безразмерный фактор возбуждения. Используем этот подход в PIC моделировании, переходя к взаимодействию с низшей симметричной модой  $TE_{01}$ . При этом радиус  $R$  регулярной части рабочего волновода эквивалентного гиротрона находится как:

$$R = \frac{v_{0,1}}{v_{28,12}} R_0, \quad (1)$$

где  $v_{0,1}$  и  $v_{28,12}$  – собственные числа эквивалентной и рабочей мод,  $R_0$  – радиус исходного гиротрона. С учетом инжекции электронов в максимум коэффициента связи моды  $TE_{01}$ , необходимо уменьшить ток пучка пропорционально увеличению коэффициента электронно-волнового взаимодействия. Одновременно необходимо выбрать длину системы и углы наклона катодного сужения и коллекторного расширения таким образом, чтобы обеспечить такое же значение добротности резонатора, как и в исходном гиротроне.

Отметим, что подобный подход позволяет достаточно хорошо моделировать динамику реальных физических систем. В частности, в недавней работе [39] были выполнены расчеты спектральных характеристики гиротрона диапазона 170 ГГц мегаваттного уровня мощности в условиях наличия флуктуаций начальной энергии электронов. Было продемонстрировано

хорошее соответствие результатов расчетов экспериментальным данным, полученных в режимах синхронизации гиротрона внешним монохроматическим сигналом.

Моделирование гиротрона выполнялось на основе аксиально-симметричной версии PIC кода KARAT [40]. На рис. 1 представлена геометрия каждого из гиротронов и мгновенное положение макрочастиц. На рис. 2 (линия с маркерами) показана полученная в результате расчетов зависимость КПД гиротрона от ведущего магнитного поля.

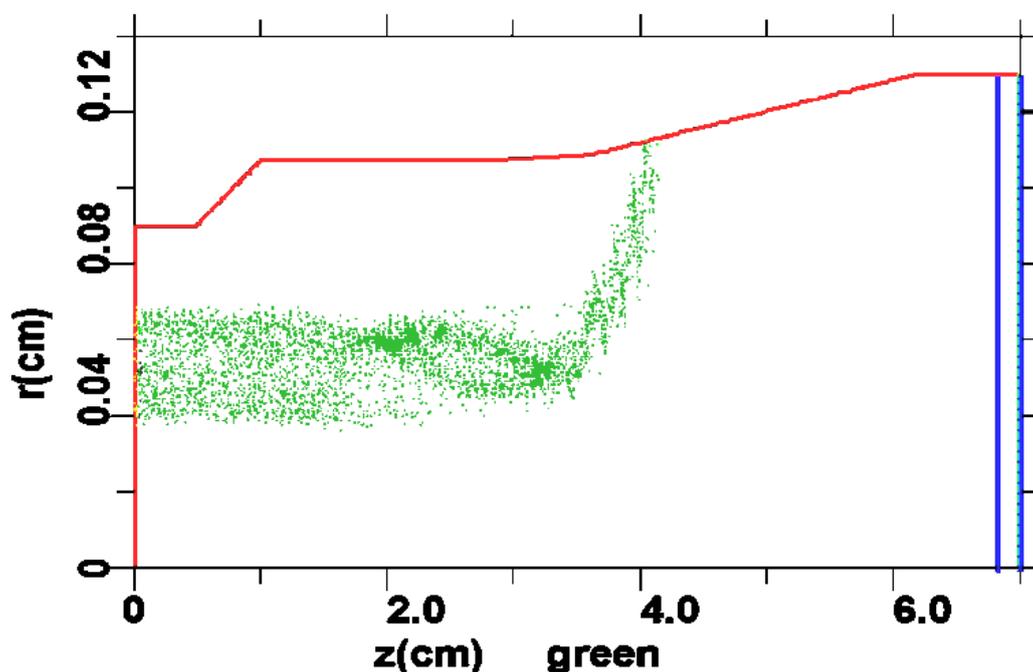


Рис. 1. Геометрия пространства взаимодействия в мгновенное положение макрочастиц в 2.5-мерной эквивалентной PIC модели гиротрона.

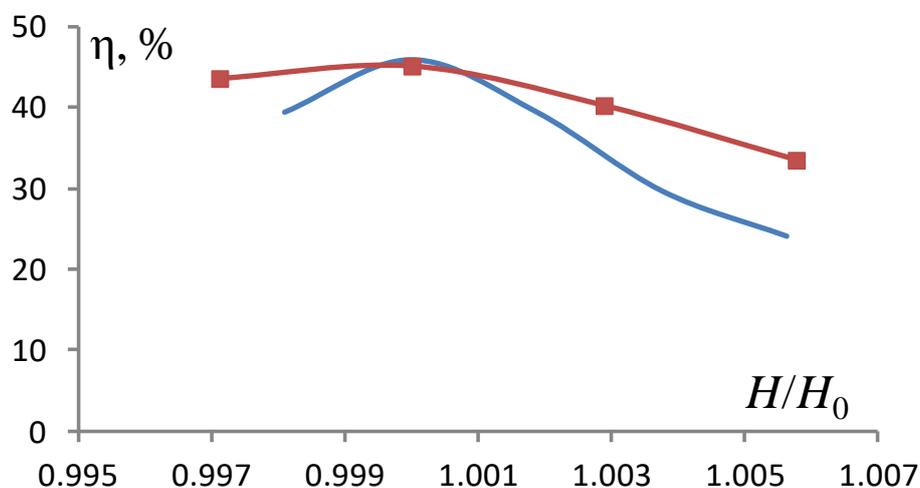


Рис. 2. Зависимость КПД исследуемого гиротрона от магнитного поля: линия с маркерами – расчет в рамках PIS-моделирования; линия без маркеров – расчет по усредненным уравнениям.

При построении модели связанных генераторов считалось, что два идентичных гиротрона размещаются друг напротив друга (рис. 3). Изменение величины связи осуществлялось с помощью поглощающего слоя, который формировался путем задания линейного роста проводимости по продольной координате от нулевого значения до заданной величины (около 2.5 См/м) и последующего линейного спада обратно до нулевого значения. В поперечном направлении поглотитель задавался однородным. Протяженность участков нарастания и спада проводимости составляла 3 мм. Регулировка величины поглощения могла осуществляться за счет варьирования максимального значения проводимости. Величина потерь рассчитывалась на основе моделирования прохождения импульсного высокочастотного сигнала в тестовой модели секции волновода с поглощающим слоем.

В свою очередь, регулировка сдвига фазы  $\Phi$  сигналов, поступающих в гиротроны, осуществлялась за счет изменения длины волноводной вставки между ними.

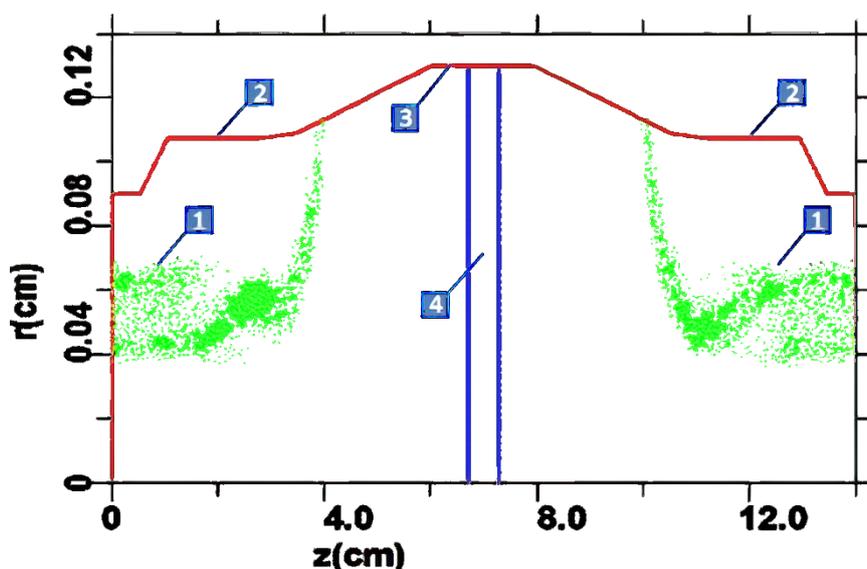


Рис. 3. Модель связанных гиротронов: 1 – винтовой электронный пучок, 2 – резонатор, 3 – волноводная вставка, 4 – поглощающий слой.

В рамках построенной модели исследовалось взаимодействие двух идентичных гиротронов, работающих в режиме максимального КПД и

расположенных вплотную друг к другу. Моделирование показывает, что поведение такой системы существенно зависит от величины сдвига фазы поступающих в гиротроны сигналов  $\Phi$ , определяемого длиной волноводной вставки. Существуют диапазоны значений  $\Phi$ , в которых, независимо от начальных условий, генераторы работают или синфазно, или противофазно (т.е. модуль разности фаз колебаний  $\Delta\phi_{1,2} = |\phi_1 - \phi_2|$  равен, соответственно, или 0, или  $\pi$ ). В то же время существует область мультистабильности, в которой установившийся режим генерации зависит от начальной разности фаз  $\Phi$  между поступающими в генераторы сигналами. На рис. 4 показаны продольные структуры высокочастотного поля в синфазном и противофазном режимах работы связанных гиротронов.

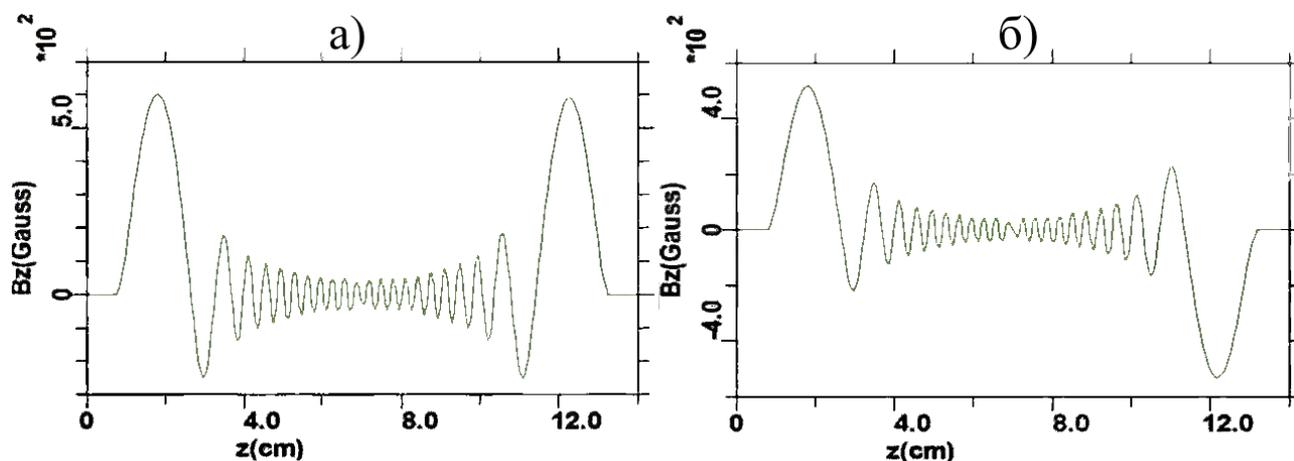


Рис. 4. Продольная структура высокочастотного поля при работе связанных гиротронов в синфазном (а) и противофазном (б) режимах.

Отметим, что КПД генерации в синфазном режиме в целом несколько превышает значения в противофазном режиме (рис. 5а). Максимальный КПД достигается в области мультистабильности и примерно равен максимуму КПД автономного генератора. На границах области мультистабильности происходит перескок собственной частоты генерации с изменением знака величины разности частот (рис. 5б). В области синхронизации частота генерации плавно меняется при изменении фазы волны  $\Phi$ . Ширина областей мультистабильности составляет  $\Delta\Phi \sim \pi/4$ , области синфазной синхронизации  $\Delta\Phi \sim \pi$ , области противофазной генерации  $\Delta\Phi \sim 3\pi/4$ .

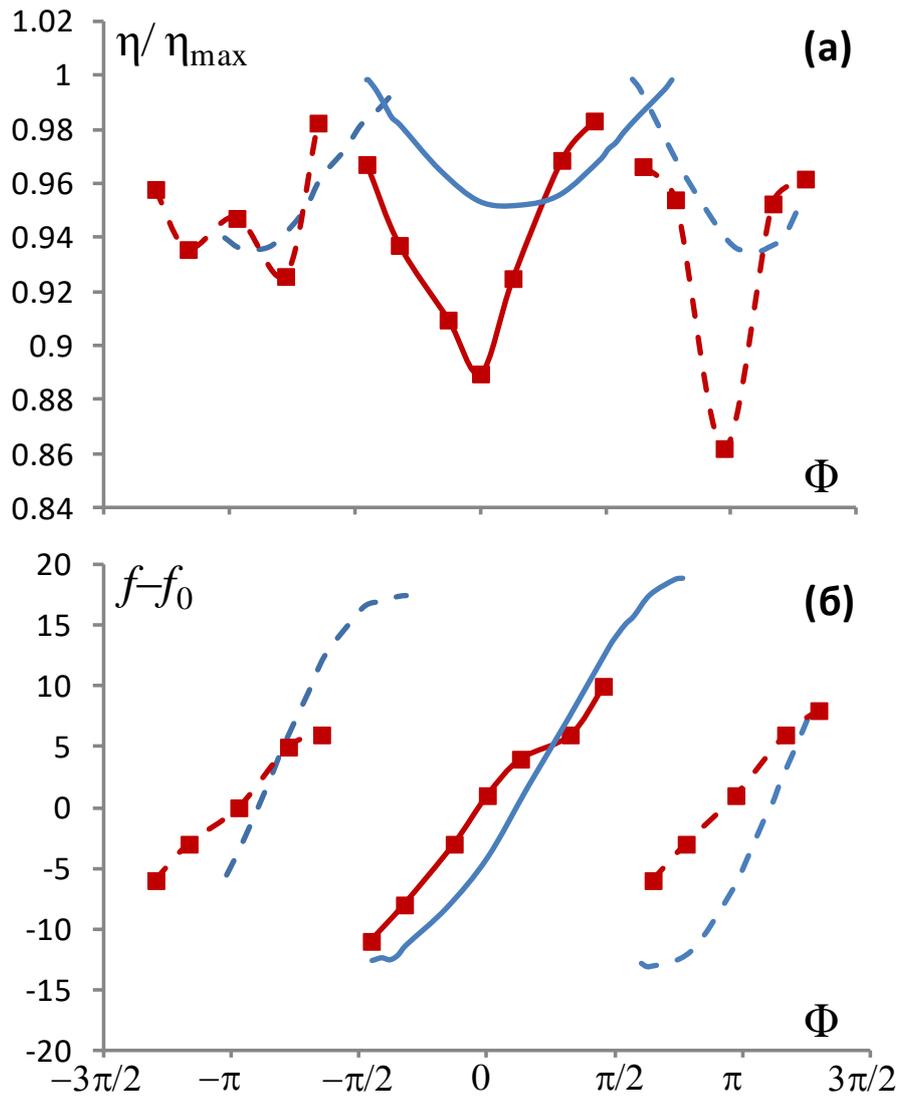


Рис. 5. Зависимость КПД (а) и отстройки частоты (б) генерации связанных гиротронов от сдвига фазы  $\Phi$  поступающих сигналов. Линии с маркерами – расчет в рамках PIC-моделирования; линии без маркеров – расчет по усредненным уравнениям. Сплошные линии – режим синфазной работы генераторов, пунктир – режим противофазной работы.

## 2. Моделирование динамики связанных гиротронов на основе усредненных уравнений

Проведем здесь сравнение результатов PIC-моделирования на основе осесимметричной эквивалентной модели гиротронов с результатами, которые могут быть получены в рамках усредненных уравнений. Рассмотрим систему из двух гиротронов, связанных через отражение от нагрузки. Предполагая, что в обоих генераторах возбуждается рабочая мода с одинаковым поперечным индексом, представим поля в рабочем пространстве в виде:

$$\vec{E}_{1,2} = \text{Re}\left(A_{1,2}(z,t)\vec{E}_{\perp}(r)\exp(i\omega_c t - im\varphi)\right), \quad (2)$$

где  $A_{1,2}(z,t)$  – медленно меняющаяся комплексная амплитуда поля,  $\vec{E}_{\perp}(r)$  описывает радиальную структуру рабочей  $TE_{m,n}$  моды цилиндрического волновода с критической частотой  $\omega_c$ , которая выбрана за несущую. Динамика каждого генераторов описывается системой уравнений [29]:

$$i\frac{\partial^2 a_{1,2}}{\partial Z^2} + \frac{\partial a_{1,2}}{\partial \tau} = \frac{I_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_{1,2} d\theta_0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p_{1,2}}{\partial Z} + \frac{g^2}{4} \frac{\partial p_{1,2}}{\partial \tau} + ip_{1,2}(\Delta_{1,2} - 1 + |p_{1,2}|^2) = -a_{1,2}$$

с граничными условиями:

$$p_{1,2}(Z=0) = \exp(i\theta_0), \quad \theta_0 \in [0, 2\pi). \quad (4)$$

В уравнениях (3), (4) использованы следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\tau = \omega_c t \frac{\beta_{\perp 0}^4}{8\beta_{\parallel 0}^2}; \quad Z = \pi \frac{\beta_{\perp 0}^2}{\beta_{\parallel 0}} \frac{z}{\lambda}; \quad a_{1,2} = \frac{eA_{1,2}J_{m-1}(2\pi R_0/\lambda)}{mc\gamma_0\beta_{\perp 0}^3}; \quad p_{1,2} = \frac{p_x + ip_y}{p_{\perp 0}} \exp(-i\omega_{1,2}^H t + i(m-1)\varphi);$$

$\Delta_{1,2} = 2(\omega_{1,2}^H - \omega_c)/\omega_c\beta_{\perp 0}^2$  – начальные расстройки циклотронного резонанса;  $g = V_{\perp 0}/V_{\parallel 0}$  – питч-фактор;  $V_{\perp 0} = \beta_{\perp 0}c$  и  $V_{\parallel 0} = \beta_{\parallel 0}c$  – поперечная и продольная скорость электронов на входе в пространство взаимодействия;

$$I_0 = 16 \frac{eI_b}{mc^3} \frac{\beta_{\parallel 0}}{\beta_{\perp 0}^6 \gamma_0} \frac{J_{m-1}^2(2\pi R_0/\lambda)}{(v^2 - m^2)J_m^2(v)} \quad (5)$$

фактор возбуждения, записанный в предположении, что электронные пучки гиротронов имеют трубчатую конфигурацию с радиусом инжекции  $R_0$ ;  $I_b$  – ток пучков;  $v_n$  –  $n$ -й корень уравнения  $dJ_m(x)/dx = 0$ ; где  $J_m(x)$  – функция Бесселя,  $\lambda = 2\pi c/\omega_c$ .

Связь гиротронов через частичные отражения от нагрузки может быть описана с помощью следующих граничных условий, которые ставятся в выходном сечении каждого гиротрона [41]:

$$a_{1,2}(L, \tau) + \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_0^{\tau} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a_{1,2}(L, \tau')}{\partial Z} d\tau' = 2S a_{2,1}(\tau - T), \quad (6)$$

здесь  $T$  – время запаздывания (время прохождения сигнала по цепи взаимной связи),  $S = |S| \exp(i\Phi)$  – коэффициент передачи излучения из одного гиротрона в другой,  $|S| \ll 1$ ,  $\Phi$  – упомянутый выше регулируемый сдвиг фазы поступающих сигналов. В отсутствие внешнего сигнала ( $S = 0$ ) модифицированные граничные условия (6) трансформируются к известным в теории гиротронов с нефиксированной структурой поля условиям излучения, впервые полученным для автономных режимов генерации в [42].

Для автономно работающего гиротрона, без учета омических потерь в стенах резонатора, значение полного КПД вычисляется по формуле:

$$\eta = \frac{g^2}{1 + g^2} \eta_{\perp}, \quad \eta_{\perp} = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |p|^2 d\theta_0. \quad (7)$$

На рис. 2 построена полученная в рамках описанной модели зависимость КПД мегаваттного 170-ГГц гиротрона с рабочей модой  $TE_{28,12}$  [38] от относительного изменения магнитного поля (линия без маркеров) вблизи его оптимальных значения. Видно, что максимальные значения КПД для двух использованных способов моделирования хорошо совпадают.

Результаты моделирования динамики двух связанных гиротронов на основе уравнений (3)-(6) представлены на рис. 5 линиями без маркеров. Рассмотрен тот же случай, что и в Разделе 1, когда гиротроны расположены вплотную друг к другу ( $T = 10$  с учетом пробега сигнала по пространству взаимодействия). Сплошные линии показывают режимы синфазной генерации, а пунктирные – противофазные режимы. Области мультстабильности соответствуют перекрытию зон синфазной и противофазной синхронизации гиротронов. Сравнение показывает хорошее соответствие результатов, полученных в рамках двух использованных методов моделирования.

## Заключение

Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность исследования синхронизации двух мощных гиротронов в рамках РС-моделирования с использованием перехода к эквивалентной осесимметричной модели электронно-волнового взаимодействия. Такой переход позволяет существенно уменьшить время проведения расчетов по сравнению с прямым трехмерным моделированием взаимодействия с высокой несимметричной гиротронной модой. Показано, что даже при использовании в качестве эквивалентной низшей осесимметричной моды круглого волновода  $TE_{0,1}$  имеет место хорошее совпадение результатов, полученных в рамках РС-моделирования, с результатами на основе моделирования усредненной системы уравнений гиротрона с модифицированными граничными условиями. При этом преимуществом РС-моделирования является возможность достаточно просто и более полно учесть в расчетах различные важные для эксперимента факторы, таких как наличие начального разброса электронов по поперечным скоростям, конечную толщину электронного пучка, эффекты провисания потенциала, пострезонаторное взаимодействие в спадающем магнитном поле и т.п. В случае усредненного подхода учет таких факторов обычно приводит к существенному усложнению используемых моделей.

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке РФФ, грант №19-79-30071.

## Литература

1. Иляков Е.В., Кулагин И.С., Нечаев В.Е. Экспериментальное исследование насыщенного мультипактора в скрещенных полях // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52. – № 12. – С. 979-986.

2. Sazontov A.G., Nechaev V.E., Vdovicheva N.K. Statistical prediction of microwave window breakdown: effects of RF magnetic field // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2012. – V. 40. – No. 2. – P. 451-462. – DOI: 10.1109/TPS.2011.2176147.
3. González-Iglesias D., Monerris Belda O., Díaz M. E., et al. Experimental Analysis of the Multipactor Effect With RF Pulsed Signals // IEEE Electron Device Letters. 2015. – V. 36. – No. 10. – P. 1085-1087. – DOI: 10.1109/LED.2015.2468068.
4. D. Wang et al. Pulse Lengthening of the Microwave Generated by TM<sub>02</sub> Mode Ka-Band RBWO Operating With Low Guiding Magnetic Field // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2021. – V. 68. – No. 6. – P. 3015-3020. – DOI: 10.1109/TED.2021.3074114.
5. Xiao R. et al. Microwave breakdown in an overmoded relativistic backward wave oscillator operating at low magnetic field // Plasma Res. Express. – 2021. – V. 3. – Art.no. 025001. – DOI: 10.1088/2516-1067/abf6b0
6. Iqbal A. et al. Recent advances in multipactor physics and mitigation // High Voltage. – 2023. – V. 8. – No. 6. – P. 1–20. – DOI: 10.1049/hve2.12335
7. Herd J.S., Conway M.D. The Evolution to Modern Phased Array Architectures // Proceedings of the IEEE. – 2016. – V. 104. – No. 3. – P. 519-529. – DOI: 10.1109/JPROC.2015.249487
8. Liu Z. et al. Coherent Combination of Power in Space With Two X-Band Gigawatt Coaxial Multi-Beam Relativistic Klystron Amplifiers // IEEE Electron Device Letters. – 2022. – V. 43. – No. 2. – P. 284-287. – DOI: 10.1109/LED.2021.3137927.
9. Бакунин В.Л., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г и др. Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на режим генерации гиротрона мегаваттного уровня мощности // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – № 7-8. – С. 539-548.
10. Шарыпов К.А., Шунайлов С.А., Гинзбург Н.С. и др. Развитие концепции мощных микроволновых генераторов со стабилизацией фазы внешним сигналом // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – № 7-8. – С. 499-507.

11. Абубакиров Э.Б., Розенталь Р.М., Тараканов В.П. Сравнение эффективности схем ввода внешних сигналов в релятивистской лампе обратной волны с резонансным рефлектором // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64. – № 1. – С. 72-76.
12. Ginzburg N.S., Cross A.W., Golovanov A.A. et al. Coherent Summation of Emission From Relativistic Cherenkov Sources as a Way of Production of Extremely High-Intensity Microwave Pulses // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2016. – V. 44. – No. 4. – P. 377-385. – DOI: 10.1109/TPS.2016.2517670
13. Goikhman M.B., Gromov A.V., Kovalev N.F., Palitsin A.V. Summation of wave beams of short microwave pulses // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2018. – Т. 23. – № 6. – С. 46-50.
14. Zhang Y. et al. Microwave Power System Based on a Combination of Two Magnetrons // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2017. – V. 64. – No. 10. – P. 4272-4278. – DOI: 10.1109/TED.2017.2737555.
15. Song M. et al. Particle-in-Cell Simulations on High-Efficiency Phase-Locking Millimeter-Wave Magnetrons with Unsynchronized High-Voltage Pulses // Electronics. – 2023. – V. 12. – Art. no. 3502. – DOI: 10.3390/electronics12163502.
16. Adilova A.B., Ryskin N.M. Theory of Peer-to-Peer Locking of High-Power Gyrotron Oscillators Coupled with Delay // Electronics. – 2022. – V. 11. – Art. no. 811. – DOI: 10.3390/electronics11050811
17. Новожилова Ю.В., Богдашов А.А., Глявин М.Ю. и др. Исследование возможности стабилизации частоты двух гиротронов при воздействии отражения от внешнего высокочастотного резонатора // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. – DOI: 10.30898/1684-1719.2023.11.23
18. Thumm M.K.A. et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive // Nucl. Fusion. – 2019. – V. 59. – No. 7. – Art. no. 073001. – DOI: 10.1088/1741-4326/ab2005
19. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация: фундаментальное нелинейное явление. – М: Техносфера, 2003.

20. Демьянченко А.Г. Синхронизация генераторов гармонических колебаний. – М.: "Энергия", 1976.
21. Usacheva S. A., Ryskin N. M. Phase locking of two limit cycle oscillators with delay coupling // *Chaos*. – 2014. – V. 24. – No. 2. – Art. no. 023123. – DOI: 10.1063/1.4881837
22. 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. – V. 22. – No. 3. – Art. no. 033101. – DOI: 10.1063/1.4913672.
23. Yakunina K. A., Kuznetsov A. P., Ryskin N. M. Injection locking of an electronic maser in the hard excitation mode // *Phys. Plasmas*. – 2015. – V. 22. – No. 11. – Art. no. 113107. – DOI: 10.1063/1.4935847.
24. Бакунин В.Л., Денисов Г.Г., Новожилова Ю.В. Фазовый захват внешним монохроматическим сигналом гиротрона с низкочастотными флуктуациями напряжения и тока // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. – 2020. – Т. 63. – № 5-6. – С. 434-445.
25. Глявин М.Ю., Денисов Г.Г., Кулыгин М.Л. и др. Стабилизация частоты гиротрона слабой отражённой волной // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. – 2015. – Т. 58. – № 9. – С. 747-758.
26. Zotova I. V., Denisov G. G., Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Rozental R. M. Time-domain theory of low-Q gyrotrons with frequency-dependent reflections of output radiation // *Phys. Plasmas*. – 2018. – V. 25. – No. 1. – Art. no. 013104. – DOI: 10.1063/1.5008666.
27. Новожилова Ю.В., Денисов Г.Г., Глявин М.Ю. и др. Стабилизация частоты гиротрона под влиянием внешнего монохроматического сигнала или отраженной от нагрузки волны: обзор // *Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика*. – 2017. – Т. 25. – № 1. – С. 4-34.
28. Melnikova M. M., Tyshkun A. V., Ryskin N. M. Theoretical Analysis of Frequency Stabilization and Pulling Effects in a Gyrotron with Delayed Reflection // *J Infrared Milli Terahz Waves*. – 2021. – V. 42. – No. 4. – P. 446-461. – DOI: 10.1007/s10762-021-00768-9.

29. Rozental R. M., Ginzburg N. S., Glyavin M. Yu., Sergeev A. S., Zotova I. V. Mutual synchronization of weakly coupled gyrotrons // *Phys. Plasmas*. – 2015. – V. 22. – No. 9. – Art. no. 093118. – DOI: 10.1063/1.4931746.
30. Адилова А.Б., Рыскин Н.М. Влияние запаздывания на взаимную синхронизацию двух связанных гиротронов // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2020. – Т. 63. – № 9. – С. 781–795.
31. Розенталь Р.М., Зотова И.В., Глявин М.Ю. и др. Расширение полосы частотной перестройки в субтерагерцовом гиротроне с внешним отражателем брэгговского типа // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2020. – Т. 63. – № 5. – С. 403–410.
32. Глявин М.Ю., Федотов А.Э., Зотова И.В. и др. Экспериментальная демонстрация возможности расширения полосы плавной перестройки частоты генерации в гиротронах с укороченным резонатором // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2018. – Т. 61. – № 11. – С. 895–899.
33. Rozental R. M., Tarakanov V. P. Potential for Acceleration of Simulation of Dynamic Processes in Oversized Gyrotrons by Means of Using 2.5 D Particle-in-Cell Method // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2022. – V. 43. – No. 5-6. – P. 479-492. – DOI: 10.1007/s10762-022-00862-6
34. Розенталь Р. М., Тай Е.М., Тараканов В.П., Фокин А.П. Использование 2,5-мерного PIC-кода для моделирования гиротронов с несимметричными рабочими модами // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2022. – Т. 65. – № 5-6. – С. 420-433.
35. R. M. Rozental, N. I. Zaitsev, I. S. Kulagin, E. V. Ilyakov and N. S. Ginzburg. Nonstationary processes in an X-band relativistic gyrotron with delayed feedback // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2004. – V. 32. – No. 2. – P. 418-421. – DOI: 10.1109/TPS.2004.829831.
36. Богдашов А.А., Глявин М.Ю., Розенталь Р.М., Фокин А.П., Тараканов В.П. Уменьшение ширины спектра излучения гиротрона при использовании внешних отражений // *Письма в ЖТФ*. – 2018. – Т. 44. – Вып. 5. – С. 87-94.

37. Glyavin M. Yu., Ogawa I., Zotova I. V. et al. Frequency Stabilization in a Sub-Terahertz Gyrotron With Delayed Reflections of Output Radiation // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2018. – V. 46. – No. 7. – P. 2465-2469. – DOI: 10.1109/TPS.2018.2797480.
38. Myasnikov V.E., Agapova M.V., Kuftin A.N. et al. Progress of 1.5–1.7 MW/170 GHz gyrotron development // 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2013. P. 1-2. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665557
39. Kuftin A.N., Fokin A.P., Rozental R.M. Simulations of the Experimental Spectral Features of Megawatt-Class Gyrotron Fed With an External Signal // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2024. – V. 71. – DOI: 10.1109/TED.2024.3390655.
40. Tarakanov V.P. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-field sensor, calorimeter etc. // EPJ Web Conf. – 2017. – V. 149. – Art. no. 04024. – DOI: 10.1051/epjconf/201714904024
41. Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V., Zheleznov I.V. Time-domain theory of gyrotron traveling wave amplifiers operating at grazing incidence // Phys. Plasmas. – 2015. – Vol. 22. – Art. no. 013112. – DOI: 10.1063/1.4906364
42. Гинзбург Н.С., Завольский Н.А., Нусинович Г.С., Сергеев А.С. Установление автоколебаний в электронных СВЧ генераторах с дифракционным выводом излучения // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1986. – Т. 29. – № 1. – С. 106-114.

**Для цитирования:**

Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Розенталь Р.М., Сергеев А.С. Моделирование динамики связанных гиротронов методом крупных частиц // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.11>