

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.5>

УДК: 537.86, 621.373

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕГАВАТТНОГО ГИРОТРОНА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ СОХРАНЕНИИ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

**Г.Г. Денисов¹, И.В. Железнов¹, И.В. Зотова¹, М.Ю. Глявин¹, А.С. Зуев¹,
А.С. Сергеев¹, А.В. Кирсанов^{1,2}, Д.Д. Крыгина¹**

**¹Институт прикладной физики РАН им. А.В. Гапонова-Грехова,
603951, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46**

**²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23**

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2026 г.

Аннотация. На основе численного моделирования проведена оптимизация параметров мегаваттного гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц и рабочей модой $TE_{25,10}$ с целью увеличения выходной мощности генерации до 1.2 МВт при сохранении приемлемого уровня пиковых тепловых нагрузок на стенку резонатора. Такой результат достигается путем повышения тока пучка при укорочении длины регулярной части резонатора. При этом тепловая нагрузка в резонаторе сохраняется на приемлемом уровне. Найдено оптимальное соотношение длины резонатора и рабочего тока с учетом ограничений по эмиссионной способности катода. Полученные данные могут быть использованы для реализации гиротрона с повышенной мощностью, соответствующей новым требованиям для системы нагрева плазмы ITER, при сохранении конфигурации катодного узла и квазиоптического преобразователя.

Ключевые слова: гиротроны, повышение мощности СВЧ излучения, управляемый термоядерный синтез, дифракционная и омическая добротности.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта ИПФ РАН FFUF-2022-0007 «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона».

Автор для переписки: Железнов Илья Владимирович, zheleznoviv@ipfran.ru

Введение

Как известно, гиротроны являются наиболее мощными источниками непрерывного излучения миллиметрового диапазона, обеспечивающими мегаваттный уровень генерации [1-6]. Мегаваттные гиротроны непрерывного действия с частотами 110-170 ГГц используются, прежде всего, для ЭЦР нагрева плазмы и управления током в установках, создаваемых для реализации управляемого термоядерного синтеза (УТС). Наиболее известной установкой такого типа является проект Международного термоядерного экспериментального реактора ITER [6,7], которому в настоящее время необходимы 24 гиротрона с частотой 170 ГГц и выходной мощностью 1 МВт каждый в импульсах длительностью 1000 секунд. Восемь таких гиротронов (а точнее гиротронных комплексов, включающих, помимо гиротрона, сверхпроводящий магнит, согласующий оптический блок, комплект источников питания, дополнительные магнитные катушки и блок управления) поставляются Россией; в настоящее время ведется их монтаж на рабочей площадке ITER с целью последующих испытаний.

В то же время, последние исследования в физике термоядерной плазмы привели к существенному увеличению роли ЭЦР нагрева по сравнению с другими методами, что возможно потребует существенного увеличения вкладываемой СВЧ мощности (в обсуждаемом варианте ITER – до 80 МВт). В этой связи, для снижения числа одновременно работающих гиротронных комплексов актуальной является задача повышения мощности отдельного гиротрона. В частности, на данный момент ITER предлагает рассмотреть возможность повышения выходной мощности излучения до 1.2 МВт в каждом

комплексе при сохранении высокого КПД (более 50 % с рекуперацией остаточной энергии).

Следует отметить, что одним из основных ограничивающих факторов повышения мощности непрерывных мегаваттных гиротронов является тепловая (омическая) нагрузка на стенку резонатора [9], удельное значение которой при использовании развитой системы охлаждения желательно иметь на уровне 2 кВт/см². Известным способом радикального снижения омических нагрузок является увеличение радиуса рабочего резонатора (т.е., его сверхразмерности), что приводит к увеличению омической добротности рабочего колебания Q_{ohm} [10,11]. При использовании такого подхода возможно существенное повышение выходной мощности. Однако, при заданной частоте генерации увеличение сверхразмерности сопровождается увеличением номера рабочей моды, что приводит к усложнению проблемы конкуренции мод. В результате КПД электронно-волнового взаимодействия может снижаться. Кроме того, такой путь требует фактически, провести разработку нового гиротрона, включая магнитную систему, резонатор, новую электронно-оптическую систему формирования электронного пучка с измененным радиусом встрела в резонатор, новый квазиоптический преобразователь рабочей моды в гауссов волновой пучок и т.п.

Вторым подходом для снижения тепловых нагрузок при сохранении рабочей моды (а, значит, и конфигурации почти всех основных узлов гиротрона) является снижение дифракционной добротности рабочего колебания Q_{dif} [10]. Это может быть обеспечено за счет изменения профиля резонатора, а именно, при укорочении длины его регулярной части и/или при уменьшении угла выходного расширения [12]. Снижение Q_{dif} также уменьшает долю омических потерь, что приводит к повышению мощности излучения, выделяемой в полезную нагрузку. Однако при этом может потребоваться существенное повышение рабочего тока, поскольку для достижения высокого КПД необходимо сохранить то же превышение над порогом генерации, а стартовые токи при снижении добротности растут. Возможность наращивания электронного

тока, в свою очередь, определяется эмиссионной способностью катода и, соответственно, повышение тока без изменения конфигурации катода (радиуса эмиссионного пояса) не может быть слишком большим. Кроме того, работа при предельно высоких плотностях эмиссии сокращает срок эксплуатации катода. Дополнительным ограничением к повышению тока является проблема самовозбуждения пространства дрейфа между катодом и резонатором гиротрона. Таким образом, в этом случае возникает задача поиска баланса между снижением добротности и наращивания тока с тем, чтобы обеспечить требуемое повышение выходной мощности гиротрона на 20 %. В данной работе такая возможность исследуется для мегаваттного гиротрона с частотой генерации 170 ГГц и рабочей модой $TE_{25,10}$ [6].

1. Постановка задачи и используемые модели

Рассмотрим электронно-волновое взаимодействие в гиротроне на основе следующей модели. Будем считать, что поливинтовой электронный пучок трубчатой конфигурации с радиусом встрела R_b поступает на вход резонатора гиротрона в виде отрезка цилиндрического волновода с плавным профилем. Указанный профиль включает в себя регулярный участок с постоянным радиусом R_w , катодное сужение и коллекторное расширение (Рис. 1), задаваемые дугами окружностей. Для проводимых расчетов параметры электронного пучка и исходная геометрия резонатора выбирались соответствующими экспериментально реализованному мегаваттному гиротрону [6] с рабочей частотой 170 ГГц и рабочей модой $TE_{25,10}$. Радиус регулярной части резонатора исследуемого гиротрона составляет $R_w = 17.785$ мм, длина – $l_w = 11$ мм, радиус встрела, соответствующий максимальной связи электронного пучка с рабочей модой, – $R_b = 7.4$ мм. Мегаваттная мощность генерации обеспечивается при ускоряющем напряжении 72 кВ и токе 42 А. Питч-фактор центральной фракции электронного пучка оценивался снизу величиной 1.1 при разбросе по поперечным скоростям 25 % по уровню 0.1-0.9 функции распределения.

Для проведения анализа возможности повышения мощности в указанном гиротроне использовалась нестационарная модель с нефиксированной продольной структурой высокочастотного поля, учитывающая, что синхронизм с рабочей и паразитными модами TE_{m_n, q_n} имеет место на первой гармонике гирочастоты ω_g . Модель включает параболические уравнения для описания пространственно-временной эволюции нормализованных амплитуд полей a_n волноводных мод вблизи критических частот $\bar{\omega}_n^c = c v_n / R_w$ и уравнения движения электронов для комплексного поперечного импульса p (см. подробнее [13]):

$$\begin{aligned}
 & i \frac{\partial^2 a_n}{\partial Z^2} + \frac{\partial a_n}{\partial \tau} + (i \Delta_n + i \delta_n(Z) + \sigma_n) a_n = \\
 & = i \frac{I_n}{4\pi^2} \frac{\int_0^{2\pi} e^{i(m_n-1)\varphi} \int f(p_0) \langle p \rangle_{\theta_0} J_{m_n-1}(v_n R_b) dp_0 d\varphi}{\int \frac{\bar{\beta}_{\parallel}}{\beta_{\parallel}} f(p_0) dp_0}, \\
 & \frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{\bar{\beta}_{\parallel}}{\beta_{\parallel}} \frac{\bar{g}^2}{4} \frac{\partial p}{\partial \tau} + i \frac{\bar{\beta}_{\parallel}}{\beta_{\parallel}} p (|p|^2 - |p_0|^2) = \\
 & = i \sum_n a_n \frac{\bar{\beta}_{\parallel}}{\beta_{\parallel}} J_{m_n-1}(v_n R_b) e^{-i(m_n-1)\varphi}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

В (1) использованы следующие обозначения (верхней чертой помечены средние значения продольной и поперечной скоростей $\bar{\beta}_{\parallel, \perp} = \bar{V}_{\parallel, \perp} / c$ на входе в пространство взаимодействия):

$$\begin{aligned}
 Z &= \bar{\beta}_{\perp}^2 \omega_g z / 2 \bar{\beta}_{\parallel} c, \quad \tau = \bar{\beta}_{\perp}^4 \omega_g t / 8 \bar{\beta}_{\parallel}^2, \quad a_n = \frac{e A_n}{m_e c \omega_g \bar{\beta}_{\perp}^3} J_{m_n-1}(v_n R_b), \\
 \bar{g} &= \bar{\beta}_{\perp} / \bar{\beta}_{\parallel}, \quad \delta_n(Z) = \frac{8 \bar{\beta}_{\parallel}^2 (\bar{\omega}_n^c - \omega_n^c(Z))}{\bar{\beta}_{\perp}^4 \bar{\omega}_n^c}, \quad \Delta_n = \frac{8 \bar{\beta}_{\parallel}^2 (\omega_g - \bar{\omega}_n^c)}{\bar{\beta}_{\perp}^4 \bar{\omega}_n^c}, \\
 I_n &= 16 \frac{e I_0}{m_e c^3} \frac{\bar{\beta}_{\parallel}}{\gamma_0 \bar{\beta}_{\perp}^6} \frac{1}{(v_n^2 - m_n^2) J_{m_n}^2(v_n)}.
 \end{aligned}$$

Функция $\varepsilon_n(Z) = 8\bar{\beta}_{\parallel}^2 \left(\bar{\omega}_n^c - \omega_n^c(Z) \right) / \bar{\omega}_n^c \bar{\beta}_{\perp}^4$ описывает изменение критической частоты n -ой моды $\omega_n^c(Z) = v_n c / R(Z)$ по продольной координате, задаваемое плавным профилем резонатора гиротрона $R(z)$. Граничные условия к (1) записывались в виде безотражательных условий излучения, соответствующих свободной дифракции волн через границу расчетной области.

Разброс в электронном пучке по скоростям в используемом слаборелятивистском приближении задавался с помощью гауссовой функции распределения электронов $f(p_0)$ по начальным поперечным импульсам со средним значением $\bar{p}_0$. При этом использовалась следующая дискретизация для $2M + 1$ фракций:

$$\begin{aligned} p_{\mu}(Z=0) &= p_{\mu}(0) e^{i\theta_0} = (1 + \varepsilon_{\mu}) e^{i\theta_0}, \\ \mu &= -M, \dots, M, \\ \alpha_{\mu} &= \exp(-\chi \mu^2). \end{aligned} \quad (2)$$

Важной характеристикой проводимых расчетов является уровень омических потерь на стенке резонатора гиротрона, который определялся на основе закона сохранения энергии, который в режиме стационарной одномодовой генерации на моде с порядковым номером n имеет вид:

$$4I_n \eta_{\perp} = P_n + \sigma_n \int_0^L |a_n|^2 dZ, \quad (3)$$

где $\eta_{\perp}$ – поперечный КПД (доля поперечной энергии электронов, передаваемая электромагнитному полю), P_n – нормализованная полезная мощность,

$\sigma_n = \frac{4\bar{\beta}_{\parallel 0}^2 d_n}{\bar{\beta}_{\perp 0}^4 R_w} \left(1 - m_n^2 / v_n^2 \right)^{-1}$ – параметр омических потерь, d_n – глубина скин-слоя,

при расчете которого считалось, что резонатор выполнен из меди с учетом шероховатости поверхности (значение проводимости стенок бралось вчетверо меньшим, чем табличное значение проводимости меди). Доля омических

потерь определялась как отношение второго члена в правой части (3) к его левой части. Далее пиковые омические нагрузки рассчитывались по продольному распределению амплитуды поля $a_n(Z)$, находимому в результате решения самосогласованной задачи.

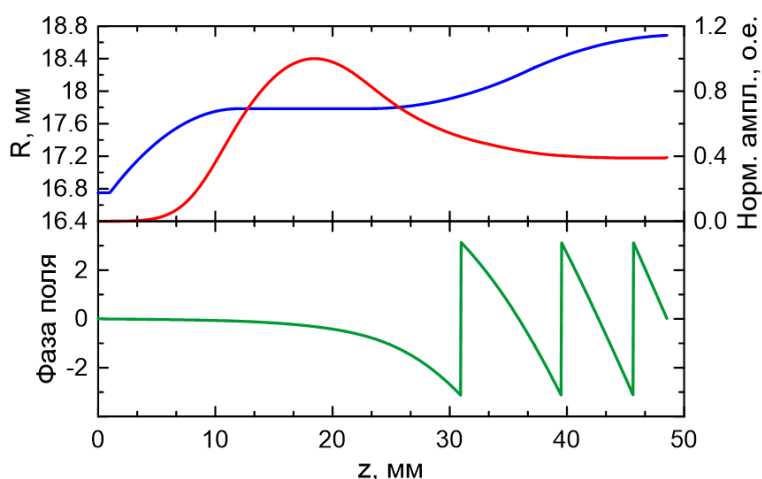


Рис. 1. Профиль резонатора рассматриваемого мегаваттного гиротрона (синяя линия), продольное распределение амплитуды (красный) и фазы (зелёный) высокочастотного поля для моды с одной продольной вариацией.

Отметим, что получаемые при описанном подходе пиковые омические нагрузки являются несколько завышенными. Дело в том, что в экспериментальной ситуации омические потери распределяются не только по резонатору гиротрона, но и по стенке квазиоптического преобразователя с радиусом, существенно превышающим радиус регулярной части резонатора. В то же время применимость параболического уравнения для описания эволюции поля квазикритических мод ограничена областью резонатора, где продольные волновые числа h малы ($h/\kappa \ll 1$, где $\kappa = v_n/R_w$ – поперечное волновое число). Таким образом, указанный подход может быть использован только в области, где радиус резонатора гиротрона остается близок к радиусу регулярной части, а волна остаётся квазикритической, т.е. её фаза меняется слабо. В этой связи в моделировании расчетная область была ограничена зоной $z \leq 40$ мм на Рис. 1. Тем не менее, поскольку в области преобразователя волна является бегущей, основная доля потерь приходится на область резонатора.

2. Результаты моделирования

На первом этапе моделирование в рамках уравнений (1) проводилось только для рабочей моды. Исследовалась зависимость выходной мощности излучения и пиковых (в максимуме распределения поля) омических нагрузок на стенке резонатора от длины регулярной части резонатора l_w и величины рабочего тока пучка. Длина l_w изменялась от 11 до 9 мм, токи варьировались в пределах от 42 до 55 А. При этом дифракционная добротность рабочей моды менялась от 1200 до 900 при сохранении омической добротности равной 52000. Отметим, что в точке 11 мм / 42 А, соответствующей номинальному режиму работы указанного гиротрона, в моделировании получено значение выходной мощности 1 МВт (омические потери ~ 33 кВт, пиковая омическая нагрузка около 2 кВт/см²), что хорошо совпадает с данными экспериментов. Во всех расчетах учитывался указанный выше разброс по поперечным скоростям электронного пучка. При исходной длине резонатора увеличение тока до 48 А приводит к повышению мощности до значения 1.2 МВт (Рис. 2а, зеленая линия), однако при этом пиковая омическая нагрузка возрастает с приемлемых 2 кВт/см² до 2.2 кВт/см², что является нежелательным для работы в непрерывном режиме.

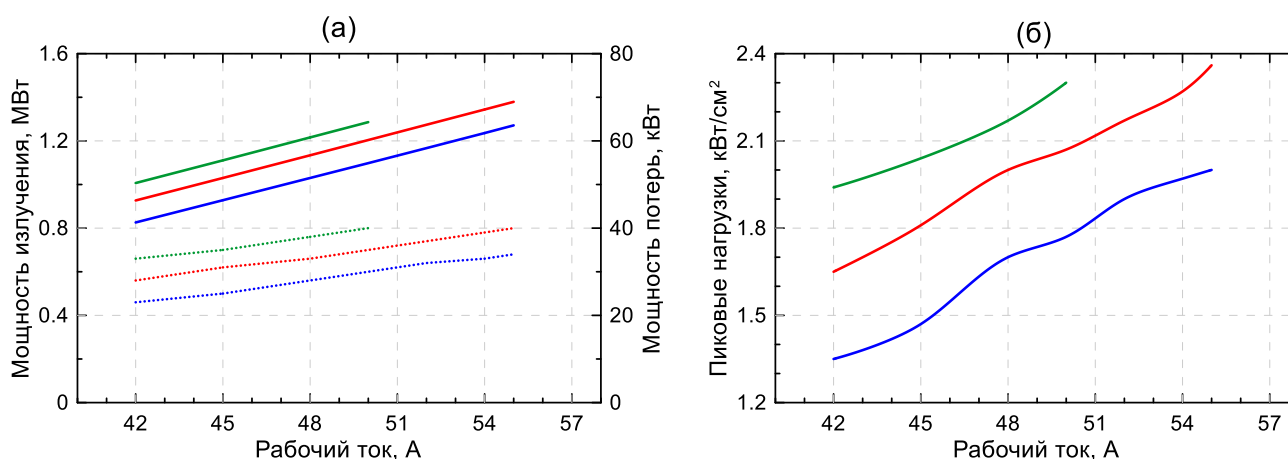


Рис. 2. Моделирование в рамках одномодового приближения:
 (а) выходная мощность гиротрона (сплошные линии) и мощность омических потерь (пунктирные линии) на стенке резонатора в зависимости от рабочего тока для разных длин регулярной части: зеленые – 11 мм, красные – 10 мм и синие – 9 мм; (б) максимальные омические нагрузки на стенке резонатора для разных длин.

Повышение мощности до 1.2 МВт при уровне омических нагрузок ≤ 2 кВт/см² может быть достигнуто при укорочении длины однородного участка резонатора до 10 и 9 мм. Однако в последнем случае, хотя тепловая нагрузка снижается сильнее, требуется повышение тока до 54 А, что приводит к заметному ухудшению качества пучка, а также снижает ресурс катода. В этом смысле оптимальной является конфигурация с длиной однородной участка 10 мм и током 50 А. Волновой КПД (отношение мощности излучения к мощности электронного пучка) при этом достигает $\eta_w = 33$ %, что на несколько процентов ниже, чем в исходной конфигурации.

В то же время, расчеты показывают, что с учётом одноступенчатой рекуперации остаточной энергии при торможении пучка в области коллектора, полный КПД гиротрона в рассматриваемом случае достигает значений, требуемых для ITER. Такой вывод следует из Рис. 3, где приведен расчетный энергетический спектр электронного пучка на выходе гиротрона с оптимизированными параметрами. Видно, что минимальная остаточная энергия электронов $E_{\min}$ равна 28 кэВ. Таким образом, общий КПД гиротрона с учетом рекуперации, который оценивается по формуле $\eta = \eta_w \cdot E_0 / (E_0 - E_{\min})$ [14] (где $E_0 = 72$ кэВ – начальная энергия электронов), достигает 56 %.

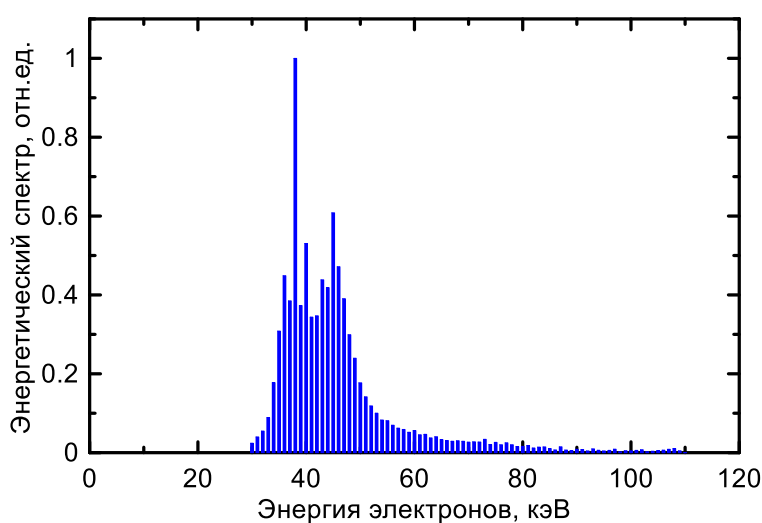


Рис. 3. Энергетический спектр электронного пучка в результате взаимодействия в оптимальном режиме генерации при длине резонатора 10 мм и рабочем токе 50 А.

Отметим, что повышение рабочего тока, несмотря на укорочение длины резонатора, может приводить к усилению конкуренции мод. При этом зона генерации рабочей моды может быть сужена, а желаемый уровень мощности – не достигаться из-за возбуждения паразитных мод в оптимальной по магнитному полю области. Поэтому на следующей стадии в рассмотрение была принята конкуренция мод в процессе включения гиротрона с изменением тока, питч-фактора и гирочастоты электронов при линейном нарастании ускоряющего напряжения. Для описания этого процесса уравнения (1) были дополнены медленными во времени функциями изменения перечисленных параметров (однако разброс по скоростям не учитывался). Полная система уравнений для этого случая подробно описана в [15].

Помимо рабочей моды $TE_{25,10}$ в расчетах учитывались ближайшие моды эквидистантного спектра $TE_{23,10}$, $TE_{24,10}$, $TE_{26,10}$, а также моды обратного вращения $TE_{-23,10}$, $TE_{-24,10}$, $TE_{-21,11}$, $TE_{-22,11}$, $TE_{-23,11}$. Считалось, что ускоряющее напряжение нарастает от 35 кВ до 72 кВ с длительностью фронта включения около 1 мкс (нормированная длительность ~ 20000), которая существенно превосходит характерные времена всех переходных процессов. Разброс по поперечным скоростям в этих расчетах не учитывался. На Рис. 4а показана полученная зависимость волнового КПД от магнитного поля, где центральная область соответствует одночастотной генерации на рабочей моде. На Рис. 4б показан типичный процесс установления стационарного режима генерации на рабочей моде, в котором на фронте напряжения сначала возбуждается мода обратного вращения $TE_{-23,11}$. Результаты представлены в логарифмическом масштабе для демонстрации полного подавления конкурирующих мод (синие линии) рабочей модой (красные линии).

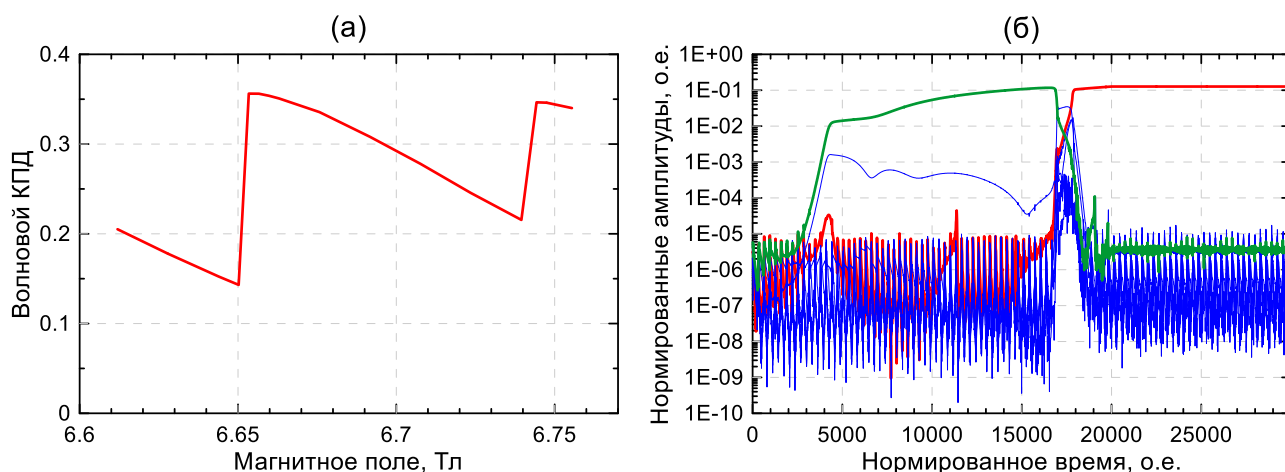


Рис. 4. Моделирование с учетом конкуренции мод на фронте включения:
 (а) волновой КПД в зависимости от магнитного поля; (б) временная зависимость нормированных амплитуд конкурирующих мод при магнитном поле 6.66 Тл, красной линией обозначена рабочая мода, зеленой – мода $TE_{-23,11}$ (основной конкурент на фронте), синими – прочие конкуренты.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование показывает, что в существующем варианте экспериментально реализованного мегаваттного гиротрона с рабочей модой $TE_{25,10}$ возможно повышение выходной мощности до 1.2 МВт при укорочении однородного участка резонатора на 1 мм и повышении рабочего тока до 50 А. При этом, вследствие снижения дифракционной добротности, омические нагрузки на стенку резонатора остаются на приемлемом уровне. Рабочий ток также находится в области допустимых значений. Соответственно, выполненная оптимизация показывает возможность создания гиротрона с повышенной мощностью, что соответствует требованиям ITER, с минимальными изменениями базовой конфигурации.

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта ИПФ РАН FFUF-2022-0007 «Создание мощных источников электромагнитного излучения ЭЦР диапазона».

Литература

1. Litvak A. G., Denisov G. G., Glyavin M. Y. Russian gyrotrons: Achievements and trends //IEEE Journal of Microwaves. – 2021. – Т. 1. – №. 1. – С. 260-268.
<https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3030917>
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.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2005>
3. Thumm M. State-of-the-art of high-power gyro-devices: 2025 update of experimental results //Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2025. – Т. 46. – №. 6. – С. 35. <https://doi.org/10.1007/s10762-025-01042-y>
4. Xu H. et al. ECRH system upgrade design using dual frequency gyrotrons for EAST //Fusion Engineering and Design. – 2021. – Т. 164. – С. 112222.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.112222>
5. Delpech L. et al. A new 3MW ECRH system at 105 GHz for WEST //Fusion Engineering and Design. – 2023. – Т. 186. – С. 113360.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113360>
6. Zapevalov V. E. et al. Development of 170 GHz/1 MW Russian gyrotron for ITER //Fusion Engineering and Design. – 2001. – Т. 53. – №. 1-4. – С. 377-385.
[https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(00\)00513-5](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(00)00513-5)
7. Darbos C. et al. ECRH system for ITER //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 2009. – Т. 1187. – №. 1. – С. 531-538.
<https://doi.org/10.1063/1.3273807>
8. <https://www.iter.org/machine/supporting-systems/external-heating-systems>
9. Запевалов В. Е. и др. Низкодобротные резонаторы для мощных гиротронов //Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1994. – Т. 37. – №. 3. – С. 381-386.
https://radiophysics.unn.ru/sites/default/files/papers/1994_3_381.pdf
10. Гиротроны: сборник научных трудов / под ред. А. В. Гапонова-Грехова. – Горький: ИПФ АН СССР. – 1981. – 232 с.

11. Нусинович Г. С., Хижняк В. И. О выборе оптимальных параметров гиротронов, работающих в режиме генерации непрерывного сигнала или импульсов большой длительности // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника – 1990. – № 9 – С. 29.
12. Запевалов В. Е. и др. Разработка прототипа многочастотного мегаваттного гиротрона в диапазоне 105-156 ГГц // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2004. – Т. 47. – №. 5-6. – С. 443-452.
<https://radiophysics.unn.ru/issues/2004/5>
13. Bandurkin I. et al. Development of third-harmonic 1.2-THz gyrotron with intentionally increased velocity spread of electrons // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2020. – Т. 67. – №. 10. – С. 4432-4436.
<https://doi.org/10.1109/TED.2020.3012524>
14. Goldenberg A. L. et al. Energy spectra of electrons and depressed potential collector in gyrotrons // International journal of infrared and millimeter waves. – 1997. – Т. 18. – №. 1. – С. 43-55. <https://doi.org/10.1007/BF02677896>
15. Denisov G. G. et al. Phase-locking of second-harmonic gyrotrons for providing MW-level output power // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2021. – Т. 69. – №. 2. – С. 754-758. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3134187>

Для цитирования:

Денисов Г.Г., Железнов И.В., Зотова И.В., Глявин М.Ю., Зуев А.С., Сергеев А.С., Кирсанов А.В., Крыгина Д.Д. Оптимизация параметров мегаваттного гиротрона для повышения выходной мощности при сохранении тепловых нагрузок. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.5.5>