



ЗОНЫ УСТОЙЧИВОЙ ОДНОМОДОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ГИРОТРОНЕ СО СВЕРХРАЗМЕРНЫМ РЕЗОНАТОРОМ

В. Л. Бакунин, Г. Г. Денисов, Н. А. Завольский, М. А. Mouseев

Путём численного исследования модели многомодового гиротрона с фиксированной структурой ВЧ- поля, на плоскости параметров «магнитное поле – ток» анализируются зоны устойчивой одномодовой генерации на частоте рабочей моды. Показано, что форма и размеры зон существенно зависят от плотности спектра мод резонатора и числа учитываемых мод-сателлитов (паразитных мод). С увеличением плотности спектра уменьшается площадь зоны, точка наибольшего значения КПД устойчивой одномодовой генерации сдвигается в область малых токов при одновременном уменьшении этого значения. При больших токах устойчивая одномодовая генерация достигается в мягком режиме возбуждения рабочей моды, а в жёстком режиме возникает примесь паразитных мод с мощностями, много меньшими мощности рабочей моды.

Ключевые слова: Гиротрон, устойчивая одномодовая генерация, плотность спектра собственных мод резонатора, фазовая связь мод, паразитные моды.

Введение

Для нагрева плазмы в существующих и проектируемых установках управляемого термоядерного синтеза требуются непрерывные гиротроны со всё большей мощностью и частотой излучения, которые в настоящее время достигают значений 1.5...2 МВт и 140...170 ГГц, соответственно. Для обеспечения приемлемого уровня омической тепловой нагрузки резонатора (порядка 2 кВт/см²) приходится увеличивать радиус резонатора и рабочие моды до TE_{28,12}...TE_{34,19} и более высоких [1–4].

При увеличении индекса рабочей моды сгущается спектр собственных частот мод, попадающих в полосу циклотронного резонанса, что повышает опасность возбуждения паразитных мод и может ограничить возможности увеличения мощности и частоты гиротронов [4–7]. Представляет интерес определение условий существования устойчивой одномодовой генерации (УОГ) на частоте рабочей моды в зависимости от плотности спектра мод резонатора.

Для наиболее точного анализа взаимодействия мод гиротрона необходимо использовать уравнения с нефиксированной продольной структурой высокочастотного поля в резонаторе [8–10]. Однако в ряде случаев при достаточно высокой добротности резонатора используется приближение фиксированной структуры [5, 11–13]. Подобные модели качественно правильно описывают многие практически важные вопросы: устойчивость рабочей моды, конкуренцию и кооперацию мод.

В настоящей работе в пространстве параметров гиротрона с фиксированной структурой ВЧ-поля путём численных расчётов определяются области (зоны), соответствующие УОГ ВЧ-излучения на частоте рабочей моды. Также определяется тенденция изменения оптимальных параметров, соответствующих максимально возможному значению КПД при УОГ, и выходных характеристик гиротрона при увеличении поперечных индексов рабочей моды и сгущении спектра собственных частот резонатора в полосе циклотронного резонанса.

1. Приближение фиксированной продольной структуры ВЧ-поля. Понятие устойчивой одномодовой генерации. Уравнения гиротрона. Эквидистантные мультиплеты. Сравнение моделей с фиксированной и нефиксированной продольной структурой ВЧ-поля

В случаях, когда диаметр резонатора гиротрона значительно превышает длину волны, в полосу циклотронного резонанса попадает большое число мод. Структура ВЧ-поля в резонаторе становится нефиксированной как по продольной координате, так и по азимутальной. Теория такого гиротрона была развита в [6, 8, 9].

При умеренной плотности спектра мод, когда их резонансные кривые не перекрываются, то есть $|\omega_{s+1} - \omega_s| \geq \omega_s/Q_s$, где ω_s – частота, Q_s – добротность s -й моды, можно использовать разложение поля по дискретному спектру мод (модовое представление). Поперечная структура поля каждой из мод считается фиксированной и совпадающей со структурой поля $TE_{m,p}$ -волны в пустом волноводе.

Обычно добротность резонаторов гиротронов достаточно велика – больше или сравнима с минимальной дифракционной добротностью [7, 14]

$$Q_s \geq Q_{\text{dif},\min} \approx 4\pi \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2 \geq 10^3, \quad (1)$$

где L – длина резонатора, λ – длина волны, соответствующая критической частоте s -й моды резонатора. В данных условиях продольная структура ВЧ-поля близка к фиксированной, соответствующей собственной моде «холодного» резонатора (в отсутствие электронного пучка). Приближение полностью фиксированной структуры ВЧ-поля позволяет получать некоторые практические важные результаты. Ниже мы ограничимся исследованием именно такой модели гиротрона.

Понятие «устойчивая одномодовая генерация», используемое нами здесь и далее, подразумевает следующее. Во-первых, расстояние между собственными частотами рассматриваемых мод резонатора превышает ширину их резонансных кривых (см. начало данного раздела), благодаря чему частоты мод являются различными и различимыми, что исключает возможность существования многомодовой одночастотной генерации. Во-вторых, предполагается, что режимы автомодуляционной и

стохастической генерации рабочей моды, соответствующие одномодовой многочастотной генерации и не являющиеся устойчивыми в соответствии со сложившейся терминологией, отсутствуют. Одномодовая многочастотная генерация наблюдалась при расчётах более сложных моделей гиротрона в [8] (низкодобротный резонатор, нефиксированная продольная структура ВЧ-поля) и в [15] (высокодобротный резонатор, наличие отражения от окна или нагрузки). В нашем случае система является высокодобротной без отражения, и данный тип генерации в расчётах не наблюдался. Эти ограничения делают понятие УОГ однозначно определённым.

Уравнения гиротрона с фиксированной продольной структурой ВЧ-поля, работающего на первой гармонике циклотронной частоты, как показано в [11–13], имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dF_s}{d\tau} + F_s &= iI_s \int_0^{\varsigma_k} f_s^*(\varsigma) \langle \langle p \rangle_\vartheta \exp(-i\psi_s) \rangle_\psi, \\ \frac{dp}{d\varsigma} + i(\Delta + |p|^2 - 1)p &= i \sum_s F_s f_s(\varsigma) \exp(i\psi_s), \\ F_s(\tau = 0) &= F_s^{(0)}, \\ p(\varsigma = 0) &= \exp(i\vartheta), \quad 0 \leq \vartheta < 2\pi. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь p – безразмерный комплексный поперечный импульс электрона, $F_s(\tau)$ – безразмерная комплексная амплитуда s -й моды, зависящие только от безразмерного времени

$$\tau = \frac{\omega_0 t}{2Q_0},$$

где t – размерное время, ω_0 – частота рабочей моды, являющаяся несущей частотой, Q_0 – добротность рабочей моды, с которой в рамках рассматриваемой модели можно отождествить добротности всех учитываемых мод Q_s ; ϑ – фаза электрона при влёте в резонатор; ψ – азимутальная координата трубок тока электронного пучка. Угловые скобки означают усреднение по этим переменным. Продольное распределение s -й моды ВЧ-поля представлено в виде

$$f_s(\varsigma) = f_{s0}(\varsigma) \exp(i\Delta_{s0}\varsigma),$$

где $f_{s0}(\varsigma)$ – продольное распределение ВЧ-поля в «холодном» резонаторе;

$$\varsigma = \frac{\beta_{\perp}^2}{2\beta_{\parallel}} \frac{\omega_0 z}{c}$$

– безразмерная продольная координата, z – размерная продольная координата, $\beta_{\parallel, \perp}$ – компоненты скорости электрона по отношению к скорости света c ; $\varsigma = \varsigma_k$ – безразмерная длина пространства взаимодействия электронов с ВЧ-полем.

Считаем, что продольная структура ВЧ-поля описывается гауссовой функцией, что соответствует реальной структуре полей открытых резонаторов гиротронов [7, 17, 18]

$$f_{s0}(\varsigma) = \exp \left[-3 \left(\frac{2\varsigma}{\varsigma_k} - 1 \right)^2 \right], \quad 0 \leq \varsigma \leq \varsigma_k, \quad (3)$$

тогда ξ_k – ширина распределения поля по уровню e^{-3} . В качестве безразмерной длины резонатора в этом случае принимается значение ширины распределения ВЧ-поля по уровню e^{-1} :

$$\mu = \frac{\beta_{\perp}^2}{2\beta_{\parallel}^2} \frac{\omega_0 L}{c} = \frac{\xi_k}{\sqrt{3}}.$$

Далее,

$$\Delta_{s0} = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \frac{\omega_s - \omega_0}{\omega_0}$$

– безразмерная отстройка частоты ω_s s -й моды от частоты рабочей моды ω_0 ;

$$\Delta = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_H}$$

– безразмерная расстройка частоты рабочей моды ω_0 и циклотронной частоты ω_H , определяемая величиной направляющего магнитного поля;

$$I_s = 2.35 \cdot 10^{-4} I (\text{A}) \frac{Q_s G_{m_s p_s}}{\beta_{\perp}^2 \beta_{\parallel} \int_0^{\xi_k} |f_{s0}(\xi)|^2 d\xi}$$

– безразмерный токовый параметр, где $I(\text{A})$ – ток электронного пучка в амперах,

$$G_{m,p} = \frac{1}{v_{mp}^2 - m^2} \left(\frac{J_{m-1}(v_{mp} R_b / R_w)}{J_m(v_{mp})} \right)^2$$

– фактор связи электронного пучка с модой $\text{TE}_{m,p}$, где R_w, R_b – радиусы резонатора и электронного пучка, соответственно, v_{mp} – p -й нуль производной функции Бесселя $J'_m(x)$;

$$\psi_s = (\omega_s - \omega_0) t_0 - (m_s - m_0) \psi$$

– добавка к фазе s -й моды, обусловленная различием времён t_0 вхождения групп электронов в пространство взаимодействия с ВЧ-полем и различием азимутальных структур мод. Для дублета мод время t_0 устраняется из первого уравнения (2) trivially – путём переопределения азимутальной координаты ψ . Аналогично исключается t_0 в случае эквидистантного мультиплета мод с одинаковыми радиальными индексами, азимутальные индексы и частоты которых удовлетворяют соотношениям фазовой связи [5, 6, 11, 13, 18]:

$$\begin{aligned} m_s &= m_0 + (-1)^s \left[\frac{s+1}{2} \right] \Delta m, \\ \omega_s &\approx \omega_0 + (-1)^s \left[\frac{s+1}{2} \right] \Delta \omega, \\ |\omega_{2k-1} + \omega_{2k} - 2\omega_0| &< \frac{\omega_0}{Q_0}, \end{aligned} \tag{4}$$

где квадратные скобки означают взятие целой части.

Гиротрон, как правило, имеет два типа взаимодействия мод – конкуренцию и кооперацию [1]. Во взаимодействии первого типа участвуют моды с различными азимутальными индексами и неэквидистантным частотным спектром, не имеющие

фазовой связи (4). Характер связи мод в этом случае – энергетический, а генерация устанавливается на частоте одной моды – имевшей в начальный момент наибольший инкремент. Эквидистантные мультиплеты мод, удовлетворяющих условию (4), участвуют во втором типе взаимодействия. Самовозбуждение мультиплетов наиболее опасно, поскольку за счёт фазовой связи такие моды имеют наименьшие стартовые токи [6, 7, 13, 18–20]. При нахождении зон УОГ мы ограничимся рассмотрением именно таких мультиплетов.

Покажем, что модель с фиксированной структурой ВЧ-поля, описываемой гауссовой функцией (3), позволяет получать качественно правильные результаты для значений орбитального КПД и для точек перехода УОГ в многомодовую генерацию. На рис. 1 приведены зависимости орбитального КПД η_{\perp} от тока электронного пучка при оптимальной настройке магнитного поля (то есть при оптимальном значении $\Delta = \Delta_{\text{opt}}$) для моделей с фиксированной и нефиксированной продольной структурой ВЧ-поля. Как следует из рис. 1, результаты расчётов показывают качественное соответствие этих двух моделей. Максимум орбитального КПД в модели с фиксированной структурой составляет 70%, что соответствует результату [7, 17] для $\mu = 15$. В модели с нефиксированной продольной структурой ВЧ-поля максимум орбитального КПД составляет 85%, что хорошо соответствует КПД гиротронов с оптимизированной структурой ВЧ-поля [3, 21]. Максимум КПД в обеих моделях достигается при близких токах пучка: $I \approx 140$ А. Переход от УОГ к многомодовой генерации с возбуждением эквидистантных мультиплетов в модели с фиксированной структурой ВЧ-поля происходит при токе $I \approx 90$ А, в модели с нефиксированной продольной структурой – при близком значении $I \approx 70\ldots80$ А.

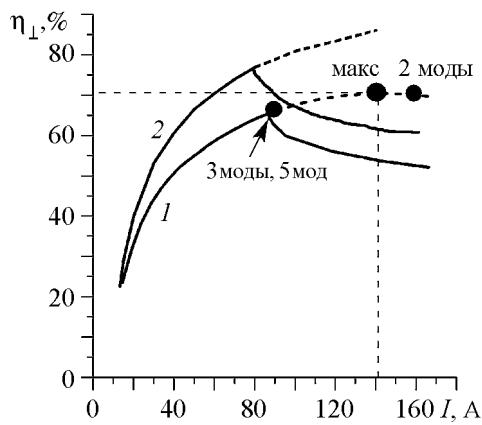


Рис. 1. Зависимость орбитального КПД $\eta_{\perp,\text{opt}}$, оптимизированного по магнитному полю, от величины тока электронного пучка для моделей гиротрона с фиксированной (кривая 1) и нефиксированной (кривая 2) структурами ВЧ-поля. Рабочая мода – $\text{TE}_{28,12}$ с частотой 170 ГГц, ускоряющее напряжение $V = 100$ кВ, питч-фактор $g = 1.2$, безразмерная длина резонатора $\mu = 15$. Точки с цифрами на кривой, соответствующей фиксированной структуре, обозначают моменты перехода устойчивой одномодовой генерации в многомодовую (указано число учитываемых мод: 2 моды – дублет $\text{TE}_{27,12} - \text{TE}_{28,12}$, 3 моды – эквидистантный триплет $\text{TE}_{27,12} - \text{TE}_{28,12} - \text{TE}_{29,12}$, 5 мод – эквидистантный пентаплет $\text{TE}_{26,12} - \text{TE}_{27,12} - \text{TE}_{28,12} - \text{TE}_{29,12} - \text{TE}_{30,12}$). Пунктиром показаны значения $\eta_{\perp,\text{opt}}$ в одномодовом приближении. Точка «макс» соответствует максимуму орбитального КПД в одномодовом приближении с фиксированной структурой ВЧ-поля, составляющему 70%

2. Влияние числа учитываемых мод на устойчивость рабочей моды

В вопросе исследования условий существования УОГ рабочей моды большое значение имеет число учитываемых паразитных мод.

На рис. 2 показана зона генерации стационарного одномодового приближения (в уравнениях (2) учитывается лишь одна мода) для фиксированной гауссовой

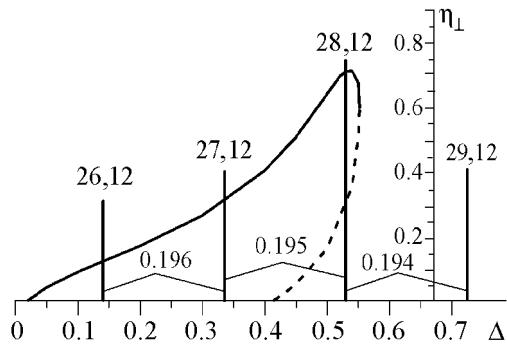


Рис. 2. Зона генерации (зависимость орбитального КПД одномодового приближения η_{\perp} от расстройки Δ). Безразмерная длина резонатора и токовый параметр пучка близки к оптимальным по КПД: $\mu = 15$, $I = 0.6$. Рабочая мода $TE_{28,12}$ имеет расстройку, оптимальную по КПД: $\Delta = 0.53$. Показаны положения мод эквидистантного мультиплета, находящихся в фазовой связи с рабочей модой и их безразмерной отстройки относительно друг друга

является несинхронным и не приводит к нарушению устойчивости ее генерации.

Учёт паразитной моды $TE_{29,12}$, находящейся вне зоны генерации, приводит к уменьшению стартового тока паразитной генерации вследствие фазовой связи мод (4) в триплете $TE_{27,12} - TE_{28,12} - TE_{29,12}$ [9]. При учёте только трёх данных мод возбуждение триплета срывает генерацию на рабочей моде (рис. 3, а). Вначале амплитуды паразитных мод остаются на уровне шумов, а амплитуда рабочей близка к стационарному значению одномодового приближения, орбитальный КПД $\eta_{\perp} = 63\%$. Нарастание амплитуд паразитных мод приводит к одновременному срыву рабочей моды и установлению генерации на левой паразитной моде $TE_{27,12}$ с орбитальным КПД $\eta_{\perp} = 27\%$. Амплитуда правой паразитной моды $TE_{29,12}$, как находящейся вне зоны генерации (см. рис. 2), в итоге снова спадает до нуля.

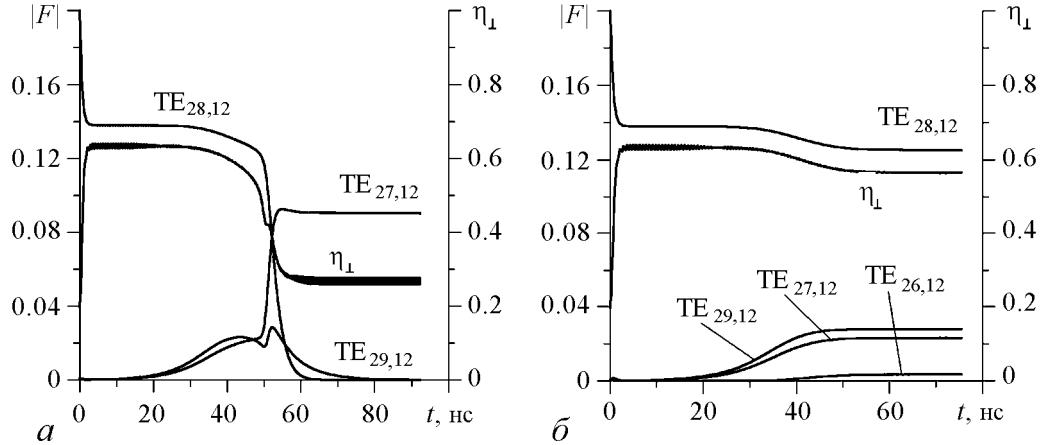


Рис. 3. Срыв генерации с рабочей моды $TE_{28,12}$ на паразитную $TE_{27,12}$ в триплете $TE_{27,12} - TE_{28,12} - TE_{29,12}$ (а). Установление многомодовой генерации с наибольшей амплитудой у рабочей моды в квадруплете $TE_{26,12} - TE_{27,12} - TE_{28,12} - TE_{29,12}$ (б). Значения параметров: $\mu = 15$, $\Delta = 0.5$, $I = 0.06$

продольной структуры ВЧ-поля (3). Верхняя ветвь кривой $\eta_{\perp}(\Delta)$ (сплошная линия) является устойчивой, нижняя (пунктир) – неустойчива. Рабочая мода $TE_{28,12}$, имеющая оптимальное значение расстройки $\Delta = 0.53$, при котором достигается максимум орбитального КПД $\eta_{\perp} = 70\%$ [7, 17], находится в режиме жёсткого возбуждения колебаний. Левые паразитные моды $TE_{27,12}$ и $TE_{26,12}$ также находятся в пределах зоны генерации и могут самовозбуждаться. Правая паразитная мода $TE_{29,12}$ находится вне зоны генерации, однако её возбуждение возможно за счёт фазовой связи мод [5, 6, 11, 13, 18].

Попарное взаимодействие рабочей моды $TE_{28,12}$ с $TE_{27,12}$ или с $TE_{26,12}$

Учёт ещё одной левой паразитной моды $TE_{26,12}$ стабилизирует рабочую моду (рис. 3, б), амплитуда которой лишь уменьшается на 15% по сравнению со стационарным одномодовым значением. Устанавливается 4-модовая генерация с орбитальным КПД $\eta_{\perp} = 56\%$, который незначительно меньше стационарного одномодового. Аналогичный результат получается при добавлении симметричной моды $TE_{26,12}$ моды $TE_{30,12}$, расположенной далее правее зоны генерации: устанавливается 5-модовая генерация с наибольшей амплитудой у рабочей моды и тем же орбитальным КПД $\eta_{\perp} = 56\%$.

Полученные результаты показывают, что необходимо, как минимум, учитывать все моды, находящиеся в пределах зоны генерации одномодового приближения плюс одну высокочастотную моду вне этой зоны. Влиянием остальных паразитных мод можно пренебречь. Поскольку ширина зоны генерации одномодового приближения (см. рис. 3) зависит от величины токового параметра, при одновременном изменении параметров Δ и I число мод, попадающих в эту зону, может изменяться. Вследствие этого при исследовании вопросов существования УОГ рабочей моды в пространстве параметров Δ, I следует учитывать уже все паразитные моды, находящиеся в полосе циклотронного резонанса и имеющие фазовую связь (4) с рабочей модой.

3. Зоны устойчивой одномодовой одночастотной генерации в пространстве параметров «магнитное поле – ток»

Выводы, сделанные в предыдущих разделах, позволяют ограничиться рассмотрением динамической системы – модели гиротрона с гауссовой фиксированной продольной структурой ВЧ- поля (3), описываемой всего 5 безразмерными параметрами.

- I – токовый параметр рабочей моды. В настоящем исследовании считаем токовые параметры всех паразитных мод также равными I , по сути пренебрегая различием $G_{m,p}$ -факторов связи мод с электронным пучком. Тем самым мы создаём более благоприятные условия для возбуждения паразитных мод (в реальности величина $G_{m,p}$ тем меньше, чем дальше отстоит паразитная мода, имеющая фазовую связь с рабочей модой, от последней). Условия для существования УОГ рабочей моды, напротив, становятся более жёсткими, и будут иметь характер «оценки сверху».
- Δ – параметр, характеризующий величину магнитного поля.
- μ – безразмерная длина резонатора, которую мы зафиксируем на значении 15, близком к оптимальному.
- $\bar{\Delta} = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \frac{\omega_1 - \omega_0}{\omega_0}$ – отстройка частоты ближайшего сателлита от частоты рабочей моды. Поскольку мы ограничиваемся рассмотрением мод, удовлетворяющих (4), нетрудно видеть, что параметр $\bar{\Delta}$ является характеристикой плотности спектра частот эквидистантных мод. Чем меньше $\bar{\Delta}$, тем плотнее спектр, и обратно.
- N – число учитываемых мод.

Зафиксировав параметры $\mu, \bar{\Delta}, N$ на плоскости параметров «магнитное поле – ток» Δ, I , будем искать области (зоны), соответствующие УОГ. Обратим внимание,

что в этих зонах существует генерация только на рабочей моде, совпадающая со стационарным режимом одномодового приближения при тех же параметрах, а амплитуды всех паразитных мод равны нулю.

В начальный момент времени рабочая мода возбуждена до амплитуды, превышающей стационарное одномодовое значение, а паразитные моды имеют амплитуды на 2 порядка меньше – на уровне шумов. Проблемы сценария приведения гиротрона в данное состояние мы не касаемся, это требует дополнительного исследования [22–24], которое будет произведено нами в последующем.

Ниже приведены результаты численных расчётов зон УОГ и их анализа по мере перехода от низших (с разреженным спектром) ко всё более высоким рабочим модам (с плотным спектром). При этом мы удваиваем поперечные индексы рабочих мод, сохраняя соотношение $m/p \approx 2$, поскольку в гиротронах мегаваттной мощности, как правило, $R_b \approx R_w/2$ [2–4]. Чем плотнее спектр, тем большее число мод, имеющих фазовую связь (4) с рабочей модой, которые необходимо учитывать, попадает в полосу циклотронного резонанса.

3.1. Мода TE_{12,5} (плотность спектра $\bar{\Delta} = 0.48$). Спектр собственных частот резонатора вблизи рабочей моды TE_{12,5} является разреженным: $\bar{\Delta} = 0.48$ (рис. 4, б). Зона УОГ для данной рабочей моды при учете 5 мод в мультиплете показана на рис. 4, а. Линия стартового тока $I_{\text{старт}}$ [17] замыкает зону при малых значениях токового параметра I , как и должно быть. Область внутри кривой стартового тока соответствует мягкому, вне – жёсткому режиму возбуждения рабочей моды. Максимальное значение орбитального КПД УОГ (отмечено точкой) равно максимальному орбитальному КПД одномодового приближения: $\eta_{\perp} = 70\%$ и достигается внутри зоны в жёстком режиме при значении токового параметра, равном оптимальному в одномодовом приближении: $I = 0.06$. Часть зоны, расположенная в области больших токов, соответствует второму и следующим максимумам КПД (имеющим меньшее значение, чем первый) и представляют интерес с точки зрения теории гиротронов [3, 16, 20].

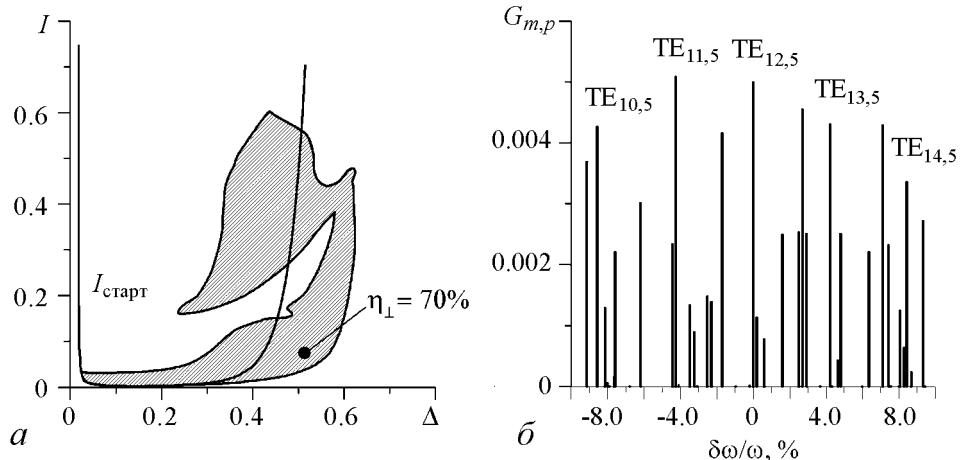


Рис. 4. Зона УОГ при $\mu = 15$, плотности спектра $\bar{\Delta} = 0.48$ (рабочая мода TE_{12,5}), $N = 5$ (эквидистантный пентаплет TE_{10,5} – TE_{11,5} – TE_{12,5} – TE_{13,5} – TE_{14,5}) (а). Зависимость $G_{m,p}$ -фактора от частоты в окрестности рабочей моды TE_{12,5} (разреженный спектр) (б)

3.2. Мода $\text{TE}_{28,12}$ (плотность спектра $\bar{\Delta} = 0.2$). В случае рабочей моды $\text{TE}_{28,12}$ спектр собственных частот резонатора является умеренно плотным: $\bar{\Delta} = 0.2$ (рис. 5, в). Для данной рабочей моды были рассмотрены два значения числа учитываемых мод: $N = 3$ и $N = 5$ (рис. 5, а). Переход от триплета к пентаплету приводит к распаду большой зоны на две – «нижнюю», расположенную в области сравнительно небольших значений токового параметра (показана отдельно на рис. 5, б) и «верхнюю», соответствующую большим значениям I . Обе меньших зоны расположены внутри большей, касаясь её, что обеспечивает одинаковые максимальные значения орбитального КПД УОГ. Это значение достигается на границе «нижней» зоны (рис. 5, б) и составляет $\eta_{\perp} = 65\%$, что несколько меньше максимума в одномодовом приближении. Рис. 1 является иллюстрацией этого явления: после того, как кривая $\Delta = \Delta_{\text{опт}}(I)$, доставляющая значения оптимизированного по магнитному полю орбитального КПД, пересечёт границу зоны УОГ, необходимо оставаться на правой границе зоны, чтобы по-прежнему обеспечивать «чистую» генерацию рабочей моды, что даёт меньшие значения η_{\perp} по сравнению с одномодовым приближением. Значение орбитального КПД УОГ при токе $I = 0.06$ (являющееся оптимальным в одномодовом приближении) составляет лишь $\eta_{\perp} = 53\%$, что заметно меньше 70%.

Заметим, что полученный результат согласуется с результатом [18], где исследовалась устойчивость генерации рабочей моды относительно возбуждения триплета. При $\bar{\Delta} = 0.2$ генерация рабочей моды с высоким орбитальным КПД устойчива ($I \approx 0.04, \eta_{\perp} \leq 65\%$), при этом она находится в жёстком режиме возбуждения колебаний. В области малых расстроек ($I \approx 0.04, \Delta \leq 0.25$) режим возбуждения колебаний – мяг-

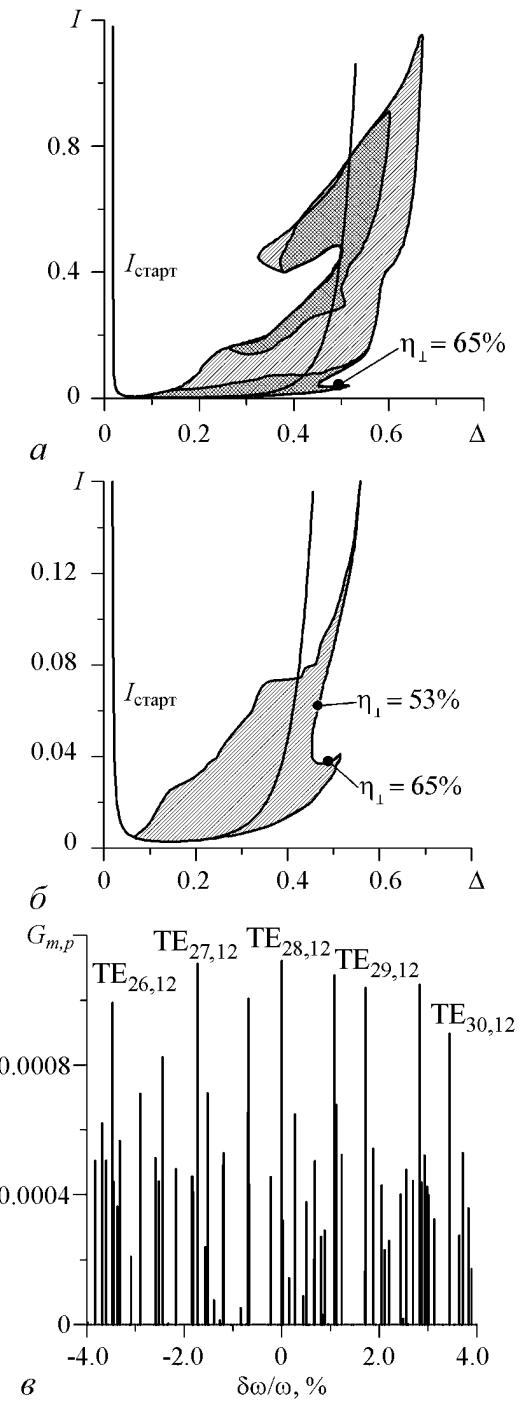


Рис. 5. Сравнение зон УОГ при $\mu = 15$, плотности спектра $\bar{\Delta} = 0.2$ (рабочая мода $\text{TE}_{28,12}$), $N = 3$ (эквидистантный триплет $\text{TE}_{27,12} - \text{TE}_{28,12} - \text{TE}_{29,12}$, одинарная штриховка) и $N = 5$ (эквидистантный пентаплет $\text{TE}_{26,12} - \text{TE}_{27,12} - \text{TE}_{28,12} - \text{TE}_{29,12} - \text{TE}_{30,12}$, двойная штриховка) (а). Первая зона УОГ для $N = 5$ крупным планом (б). Зависимость $G_{m,p}$ -фактора от частоты в окрестности рабочей моды $\text{TE}_{28,12}$ (умеренно плотный спектр) (в).

кий, однако попасть отсюда в область высоких КПД мешает самовозбуждение паразитных мод, поскольку область малых расстроек находится за пределами зоны УОГ.

3.3. Мода $\text{TE}_{56,24}$ (плотность спектра $\bar{\Delta} = 0.1$). В случае рабочей моды $\text{TE}_{56,24}$ спектр собственных частот является плотным: $\bar{\Delta} = 0.1$ (рис. 6, б). Мультиплет состоит из 11 мод, попадающих в полосу циклотронного резонанса. Зона УОГ приведена на рис. 6, а. Максимальное значение орбитального КПД $\eta_{\perp} = 58\%$ достигается на границе зоны. При токе $I = 0.06$ максимальное значение $\eta_{\perp} = 39\%$, при чём оно достигается уже не в жёстком режиме, как в случае рабочей моды $\text{TE}_{28,12}$, а в мягком режиме.

3.4. Мода $\text{TE}_{112,48}$ (плотность спектра $\bar{\Delta} = 0.05$). Для высокой рабочей моды $\text{TE}_{112,48}$ спектр собственных частот является очень плотным: $\bar{\Delta} = 0.05$ (рис. 7, б). В полосу циклотронного резонанса попадают 19 мод, находящихся в фазовой связи с рабочей модой. Зона УОГ приведена на рис. 7, а. Максимальное

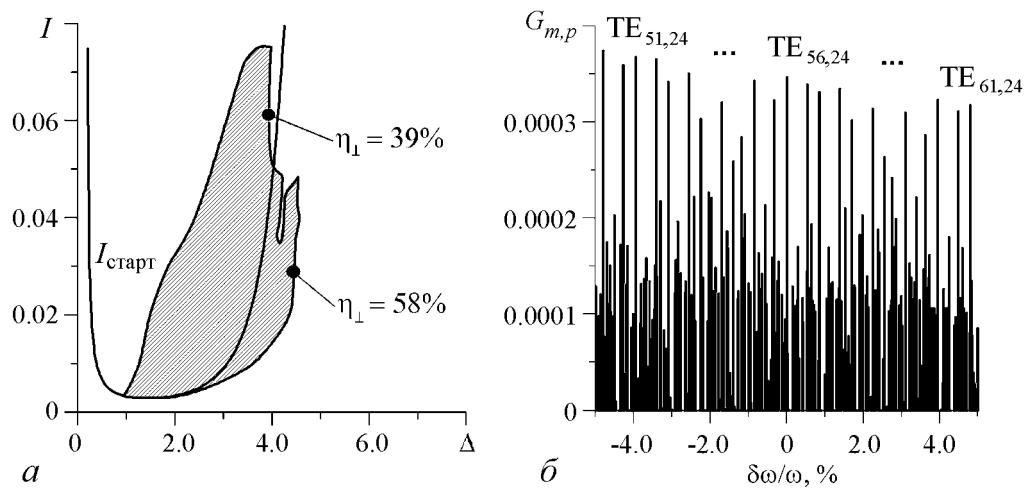


Рис. 6. Зона УОГ при $\mu = 15$, плотности спектра $\bar{\Delta} = 0.1$ (рабочая мода $\text{TE}_{56,24}$), $N = 11$ (эквидистантный мультиплет $\text{TE}_{51,24} - \dots - \text{TE}_{56,24} - \dots - \text{TE}_{61,24}$) (а). Зависимость $G_{m,p}$ -фактора от частоты в окрестности рабочей моды $\text{TE}_{56,24}$ (плотный спектр) (б)

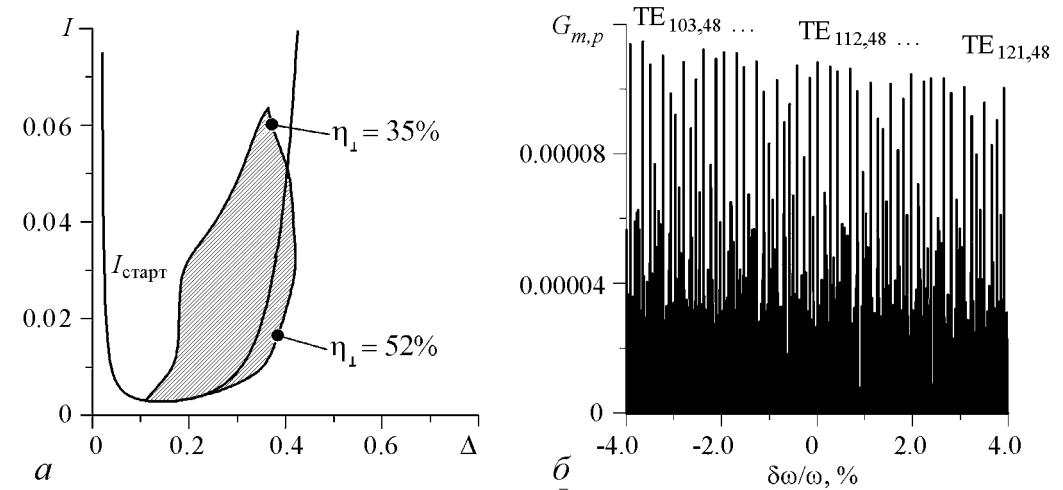


Рис. 7. Зона УОГ при $\mu = 15$, плотности спектра $\bar{\Delta} = 0.05$ (рабочая мода $\text{TE}_{112,48}$), $N = 19$ (эквидистантный мультиплет $\text{TE}_{103,48} - \dots - \text{TE}_{112,48} - \dots - \text{TE}_{121,48}$) (а). Зависимость $G_{m,p}$ -фактора от частоты в окрестности рабочей моды $\text{TE}_{112,48}$ (очень плотный спектр) (б)

значение орбитального КПД $\eta_{\perp} = 52\%$ достигается также на границе зоны. При токе $I = 0.06$ наибольшее значение орбитального КПД $\eta_{\perp} = 35\%$ достигается также в мягком режиме.

3.5. Выводы из полученных результатов. Основные результаты, полученные в настоящей работе, проиллюстрируем рис. 8. Здесь друг на друга наложены «нижняя» зона УОГ, полученная для рабочей моды $TE_{28,12}$ и мультиплета из 5 мод, зона УОГ для рабочей моды $TE_{56,24}$ и мультиплета из 11 мод и зона УОГ для рабочей моды $TE_{112,48}$ и мультиплета из 19 мод. Рис. 8 вкупе с рис. 5, б, рис. 6, а и рис. 7, а иллюстрирует общую тенденцию – с увеличением поперечных индексов рабочей моды и сгущением спектра собственных частот резонатора:

- уменьшается площадь зоны УОГ;
- уменьшается максимальное значение орбитального КПД УОГ, соответствующий этому значению токовый параметр также уменьшается;
- при значении токового параметра, являющемся оптимальным в одномодовом приближении, генерация рабочей моды смещается из жёсткого режима в мягкий.

Также обращают на себя внимание ещё два интересных факта:

- несмотря на быстрое увеличение (удвоение) поперечных индексов рабочей моды и уплотнение спектра площадь зоны уменьшается достаточно медленно – это говорит о том, что при обеспечении сценария включения, приводящего к начальному моменту времени к возбуждению рабочей моды и удерживанию паразитных мод на уровне шумов, возможна УОГ даже на очень высокой моде в области очень плотного спектра собственных частот ($TE_{112,48}$) с достаточно высоким КПД ($\eta_{\perp} = 52\%$);
- вследствие сложной формы границ зон при фиксированной расстройке Δ возможно чередование зон УОГ рабочей моды с областями многомодовой генерации (и/или с областями неустойчивости рабочей моды).

Необходимо отметить, что полученный нами результат близок к результату [23], где также исследуются зоны УОГ в пространстве параметров гиротрона. Однако в [23] в качестве рабочей моды принимаются высокие моды «шепчущей галереи», такие как $TE_{80,4}$ – с менее развитой пространственной структурой и более разреженным спектром – Δ варьируется от 0.97 до 0.13. Границы зон УОГ в [23] делятся на два типа: соответствующие возбуждению двух ближайших к рабочей моде паразитных мод и многомодовой генерации с участием большего числа паразитных мод. В нашем случае рабочие моды $TE_{12,5}$, $TE_{28,12}$, $TE_{56,24}$, $TE_{112,48}$ имеют более развитую пространственную структуру, а начиная с моды $TE_{56,24}$

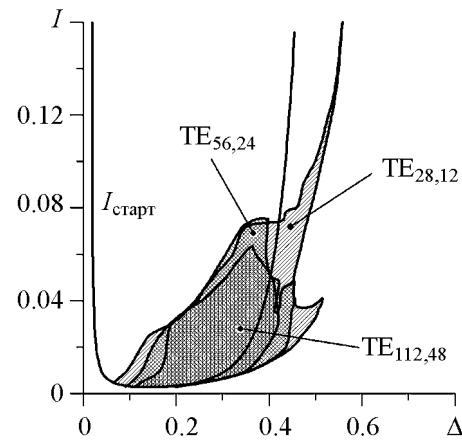


Рис. 8. Сравнение зон УОГ при $\mu = 15$ для $\bar{\Delta} = 0.2$ (рабочая мода $TE_{28,12}$, эквидистантный мультиплет из 5 мод, одинарная штриховка), $\bar{\Delta} = 0.1$ (рабочая мода $TE_{56,24}$, эквидистантный мультиплет из 11 мод, двойная штриховка), $\bar{\Delta} = 0.05$ (рабочая мода $TE_{112,48}$, эквидистантный мультиплет из 19 мод, тройная штриховка)

спектр собственных частот резонатора более плотный, чем в [23]. Кроме того, при определении границ зон УОГ мы не производили их разделение по типам неустойчивости, и рассматривали все имеющие фазовую связь с рабочей модой паразитные моды, попадающие в полосу циклотронного резонанса, не ограничивая их количество. При этом полученный нами вывод о медленном убывании площади зоны УОГ при сгущении спектра согласуется с аналогичным результатом [23].

Влияние густоты спектра на устойчивость рабочей моды исследовалось также в работах [25, 26]. Результат, полученный в [26] для модели лазера на свободных электронах, состоит в том, что при токе электронного пучка, не превышающем или равном оптимальному по КПД, устанавливается одномодовая генерация – на моде, имеющей наибольший инкремент, причем это утверждение справедливо при сколь угодно плотном эквидистантном спектре мод зеркального резонатора. При увеличении тока пучка в [25, 26] рабочая мода становится неустойчивой относительно возбуждения ближайших сателлитов, при больших токах возникает режим автомодуляционной, а затем стохастической генерации. В отличие от модели [25, 26], модель гиротрона с фиксированной структурой ВЧ-поля, рассмотренная нами, описывается иными уравнениями, благодаря чему на высоких рабочих модах точка оптимального по КПД набора параметров оказывается вне зоны УОГ. Отметим, что в рамках нашей модели при определённом наборе параметров, в частности $\bar{\Delta} = 0.2$ (рабочая мода $TE_{28,12}$), $\mu = 15$, $I = 0.14$, $\Delta = 0.5$, возможна многомодовая автомодуляционная генерация. Стохастическая же генерация даже при токах, значительно превышающих стартовый, при всех рассмотренных в данной работе значениях параметров гиротрона не наблюдалась (аналогичное этому заключение сделано в [5]).

В настоящей работе не рассматривались моды, не имеющие фазовой связи (4) с рабочей модой. Таковыми являются, в частности, моды обратного вращения и моды с радиальными индексами, отличными от такового у рабочей моды. Влияние этих мод на форму зон УОГ будет рассмотрено в дальнейшем. Кроме того, в спектре собственных колебаний резонатора присутствует большое количество мод с малыми $G_{m,p}$ -факторами связи с электронным пучком, в 2 и более раз меньшими $G_{m,p}$ -фактора рабочей моды. Такие моды опасности для УОГ рабочей моды не представляют. Более подробно это будет рассмотрено в дальнейшем.

Заключение

В настоящей работе путём численного исследования модели одномодового гиротрона с фиксированной структурой ВЧ-поля получены и проанализированы зоны устойчивой одномодовой генерации на частоте рабочей моды в пространстве рабочих параметров «ток электронного пучка – магнитное поле». Как следует из полученных результатов, размеры зон зависят от густоты спектра паразитных мод, находящихся в полосе циклотронного резонанса и имеющих фазовую связь с рабочей модой, однако площадь зоны с увеличением рабочей моды уменьшается достаточно медленно. Однако наибольшее достижимое значение КПД устойчивой одномодовой генерации уменьшается, а соответствующая ему точка в пространстве параметров смещается в сторону уменьшения тока. При больших токах и высокой рабочей моде

устойчивая одномодовая генерация возможна только при значениях рабочих параметров, соответствующих мягкому режиму возбуждения рабочей моды.

Авторы выражают благодарность В.Е. Запевалову и М.Ю. Глявину за обсуждение работы и ценные критические замечания.

Библиографический список

1. *Litvak A.G., Denisov G.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Azizov E.A., Ilin V.I.* Development in russia of megawatt power gyrotrons // J. Infrared Milli Teraherz Waves. 2011. Vol. 332. P. 337.
2. *Аликаев В.В., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е., Курбатов В.И., Литвак А.Г., Мясищиков В.Е., Тай Е.М.* Гиротроны для УТС // Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2002. С. 71.
3. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т.1. Стационарные процессы // Под редакцией А.А. Кураева, Д.И. Трубецкова. М.: Физматлит, 2009.
4. *Thumm M.* State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. Karlsruhe: KIT, 2010.
5. *Nusinovich G.S.* Mode interaction in gyrotrons // Int. J. Electronics. 1981. Vol. 51, № 4. P. 457.
6. *Петелин М.И.* Электронная селекция мод в гиротроне // Гиротрон. Сборник научных трудов. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 77.
7. *Nusinovich G.S.* Introduction To The Physics of Gyrotrons // The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2004.
8. *Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A.* Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators // Int. J. Electronics. 1986. Vol. 61, № 6. P. 881.
9. *Завольский Н.А., Нусинович Г.С.* Нестационарные процессы в гиротроне с нефиксированной структурой ВЧ поля // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36, № 1. С. 135.
10. *Завольский Н.А., Нусинович Г.С., Павельев А.Б.* Устойчивость одномодовых колебаний и нестационарные процессы в гиротронах со сверхразмерными низкодобротными резонаторами // Гиротрон. Сборник научных трудов. Горький. ИПФ АН СССР. 1989. С.84.
11. *Моисеев М.А., Нусинович Г.С.* К теории многомодовой генерации в гиромонотроне // Изв. вузов. Радиофизика.1974. Т. XVII, № 11. С. 1711.
12. *Бляхман Л.Г., Нусинович Г.С.* Динамика многомодовых электронных мазеров // Радиотехника и электроника. 1982, № 5.
13. *Запевалов В.Е., Нусинович Г.С.* К теории амплитудно-фазового взаимодействия мод в электронных мазерах // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, № 3. С. 347.
14. *Власов С.Н., Загрядская Л.И., Петелин М.И.* Резонаторы и волноводы с модами шепчущей галереи для мазеров на циклотронном резонансе // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16, № 11. С. 1743.
15. *Dumbrajs O., Glyavin M.Yu., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A.* Influence of reflections on mode competition in gyrotrons // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. Vol. 28. P. 588.

16. Cai S.Y., Antonsen T.M., Saraph G.Jr., Levush B. // Int. J. Electron. 1992. Vol. 72, № 5–6. P. 759.
17. Нусинович Г.С., Эрм Р.Э. КПД МЦР-монотрона с гауссовым продольным распределением высокочастотного поля // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1972, № 8. С. 55.
18. Глявин М.Ю., Нусинович Г.С. Устойчивость одномодовых автоколебаний в гиротроне с синхронным взаимодействием мод // Радиотехника и электроника, 1991.
19. Dumbrajs O., Anderer J., Illy S., Piosczyk B., Thumm M., Zavolsky N.A. Multi-frequency operation of a gyrotron // IEEE Transactions on Plasma Science. 1999. Vol. 27, № 2.
20. Carmel Y., Chu K.R., Read M.E., Klim K.J., Arfin B., Dialetis D., Fliflet A. Mode competition, suppression, and efficiency enhancement in overmoded gyrotron oscillators // Int. J. Infrared and MM Waves. 1982. Vol. 3. P. 645.
21. Кураев А.А., Ковалев И.С., Колосов С.В. Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ. Минск: Наука и техника, 1975.
22. Нусинович Г.С. Способы подачи напряжений на импульсный гиромонotron, обеспечивающие высокий КПД в режиме одномодовой генерации // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1974. № 3. С. 44.
23. Levush B., Antonsen T.M. Mode competition and control in high-power gyrotron oscillators // IEEE Transactions on Plasma Science. 1990. Vol. 18, № 3. P. 260.
24. Grudiev A., Raguen J.-Y., Schunemann K. Numerical study of mode competition in coaxial cavity gyrotrons with corrugated insert // Int. J. of Infrared and Millimeter Waves. 2003. Vol. 24, No. 2. P. 173.
25. Bogomolov Ya.L., Bratman V.L., Ginzburg N.S., Petelin M.I., Yunakovskiy A.D. Non-stationary generation in free electron lasers // Optics Communications. 1981. Vol. 36, № 3. P. 209.
26. Ginzburg N.S., Petelin M.I., Sergeev A.S. On the mechanism of self-modulation onset in free electron lasers // Optics Communications. 1985. Vol. 55, № 4. P. 283.

ИПФ РАН, Н. Новгород

Поступила в редакцию

24.04.2012

После доработки

21.06.2012

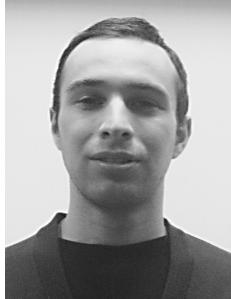
ZONES OF STABLE SINGLE-MODE GENERATION IN OVERMODED GYROTRONS

V.L. Bakunin, G.G. Denisov, M.A. Moiseev, N.A. Zavolsky

During numerical simulations of the model of gyrotron with fixed field-structure, zones of stable single-mode generation of the work mode are analyzed on the plane of parameters «magnetic field – beam current». It is shown that area and sizes of the zones are strongly dependent on the spectral density of eigen-frequencies of the resonator and on number of considered parasit modes. With increase of spectral density the point of highest attainable efficiency of stable single-mode generation shifts to the region of lower currents and simultaneously this value of efficiency decreases. In the region of higher

currents stable single-mode generation exists in soft self-excitation regime of the work mode, while in the region of hard self-excitation of the work mode multimode generation with power of parasit modes much less than power of the work mode arises.

Keywords: Gyrotron, stable single-mode generation, spectral density of the resonator, phase relationship of the modes, parasit modes.



Бакунин Владимир Лазаревич – родился в Горьком (1986). Окончил магистратуру физического факультета Нижегородского государственного университета им. Лобачевского (2009), с момента окончания по настоящее время работает в Институте прикладной физики РАН. Область научных интересов – численные методы, исследование электронно-волнового взаимодействия и динамических режимов генераторов СВЧ-излучения мегаваттного уровня мощности.

603950 Н. Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: knightrider7@yandex.ru



Денисов Григорий Геннадьевич – родился в Горьком (1956). Окончил радиофизический факультет Горьковского госуниверситета по специальности «Радиофизика и электроника» (1978). Д.Ф.-м.н. (2002), профессор, чл.-корр. РАН, зав. Отделом электронных приборов ИПФ РАН. Автор более 200 научных работ. Профессиональные интересы – мощные источники электромагнитного излучения, многомодовые системы, методы измерения, преобразования структур полей квазиоптических волновых пучков, антенны и линии передачи мощного коротковолнового излучения

603950 Н. Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: den@appl.sci-nnov.ru



Моисеев Марк Андреевич – родился в Горьком (1943). Окончил Горьковский государственный университет по специальности радиофизика (1966). После окончания работал в НИРФИ, а затем до настоящего момента в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН) Область научных интересов: теоретическое исследование электронно-волновых процессов в мощных гироприборах, распространения радиоволн в квазиоптических системах. Автор более 80 публикаций.

603950 Н. Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: moiseev@appl.sci-nnov.ru



Завольский Николай Александрович – родился в 1956 году в Ворсме (Нижегородская область). Окончил Горьковский государственный университет по специальности математика (1978). После окончания и до настоящего момента работает в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН) Область научных интересов: численные методы и разработка программного обеспечения в решении задач акустики, распространения радиоволн и электронно-волнового взаимодействия в гиротронах. Автор более 80 научных работ.

603950 Н. Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: zavolsky@appl.sci-nnov.ru