

УДК 621.385.69

ВЛИЯНИЕ КОНКУРЕНЦИИ МОД НА РЕЖИМ ЗАХВАТА ЧАСТОТЫ МНОГОМОДОВОГО ГИРОТРОНА ВНЕШНИМ МОНОХРОМАТИЧЕСКИМ СИГНАЛОМ

В. Л. Бакунин¹, Г. Г. Денисов¹, Ю. В. Новожилова^{1,2}, А. П. Фокин¹*

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Исследован режим захвата частоты рабочей моды гиротрона внешним монохроматическим сигналом в условиях конкуренции нескольких мод. Расчёты выполнены для гиротрона мегаваттного уровня мощности на частоте 170 ГГц с рабочей модой $TE_{28,12}$. Рассматривалось взаимодействие мод как эквидистантного, так и неэквидистантного спектров. Расстройка по частоте между модами сравнима с шириной полосы циклотронного резонанса. Исследовано изменение границ зон захвата частоты в многомодовом гиротроне в зависимости от мощности внешнего сигнала. Рассмотрена возможность достижения высокого коэффициента полезного действия и широкополосной перестройки частоты в режиме захвата.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование захвата частоты гиротрона внешним монохроматическим сигналом представляет интерес в связи с возможностью использования этого эффекта для создания комплекса когерентно излучающих гиротронов. Синхронизация колебаний гиротрона внешним монохроматическим сигналом в первых теоретических работах рассматривалась в рамках достаточно простых моделей с малым числом взаимодействующих мод и стационарными параметрами электронного пучка на входе в пространство его взаимодействия с излучением [1–4]. В настоящее время для мощных гиротронов, работающих на модах высокого порядка, важной становится проблема подавления большого числа паразитных мод, которые могут возбуждаться уже на стадии включения ускоряющего напряжения. Захват частоты гиротрона внешним монохроматическим сигналом может подавить паразитные моды. Недавняя разработка в ИПФ РАН квазиоптического преобразователя, трансформирующего внешний сигнал в рабочую моду резонатора гиротрона [5], дала новый импульс исследованиям воздействия внешнего сигнала на гиротрон [6–9]. В работах [6, 8, 9] было показано, что в результате захвата частоты многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом может быть достигнута одномодовая генерация на частоте внешнего сигнала. В работе [6] исследовался гиротрон с эквидистантным спектром мод и нефиксированной продольной структурой электрического поля в пространстве взаимодействия. В работах [8, 9] для различного числа взаимодействующих мод в приближении фиксированной продольной структуры поля были найдены зоны захвата — области параметров гиротрона, при которых реализуется одномодовая генерация на частоте внешнего сигнала. Моделирование проводилось при параметрах, соответствующих прототипу гиротрона для ITER: мощность 2 МВт, частота 170 ГГц, рабочая мода $TE_{28,12}$. Было показано, что размеры зон захвата уменьшаются с ростом числа взаимодействующих мод до тех пор, пока их частоты лежат в полосе циклотронного резонанса.

Целью настоящей работы является дальнейшее исследование влияния взаимодействия мод на процесс захвата частоты в многомодовом гиротроне. Рассмотрено изменение границ зон захвата

* julia.novozhilova2009@yandex.ru

при увеличении мощности внешнего сигнала. Показано, что выход из режима захвата обусловлен конкуренцией мод. Продемонстрировано улучшение основных технических характеристик гиротрона в режиме захвата частоты: токи электронного пучка, соответствующие оптимальным значениям коэффициента полезного действия (КПД), оказываются ниже, а полоса перестройки частоты — шире, чем в автономном режиме. Численное моделирование проведено на основе алгоритма, развитого в работе [8] для описания взаимодействия мод как эквидистантного, так и неэквидистантного спектра, расстройка по частоте между модами сравнима с шириной полосы циклотронного резонанса. Параметры гиротрона выбирались такими же, как в работах [8, 9]. Использовалось приближение фиксированной продольной структуры поля, что можно считать оправданным для описания основных закономерностей процесса захвата частоты в гиротроне с указанными параметрами. Сценарий включения гиротрона (т. е. достижения стационарных входных параметров электронного пучка) был близок к применяемому на практике для достижения высокого КПД в данном гиротроне.

1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим модель многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности с резонатором в виде отрезка слабонерегулярного волновода, показанным на рис. 1. Предположим, что ширина линии резонатора ω_s/Q_s мала по сравнению с шириной полосы циклотронного резонанса $\Delta\Omega = 2\pi/T_t$, обратно пропорциональной времени пролёта электронов через пространство взаимодействия T_t :

$$\omega_s/Q_s \ll \Delta\Omega. \tag{1}$$

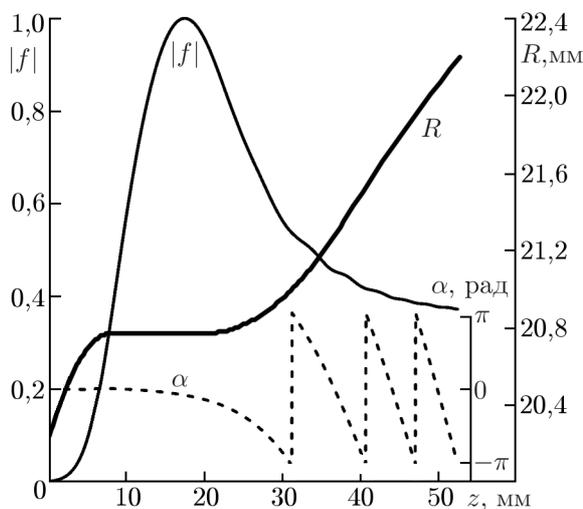


Рис. 1. Структура электрического поля в резонаторе гиротрона; $R(z)$, $|f(z)|$ и $\alpha(z)$ — зависимости радиуса резонатора, модуля и фазы поля от продольной координаты z

Здесь s — номер моды (номер рабочей моды примем равным нулю), ω_s и Q_s — действительная часть «холодной» (т. е. рассчитанной в отсутствие электронного пучка) собственной частоты и добротность s -й моды соответственно. Добротность рабочей моды резонатора в рассматриваемом гиротроне равна $Q_0 = 1370$, добротности других мод отличаются не более, чем на 5%, так что ширина линии для всех мод резонатора составляет $\omega_s/Q_s \approx 8 \cdot 10^8$ рад/с. Длину пространства взаимодействия будем считать равной 20 мм, что в два раза превышает длину однородного участка резонатора (см. рис. 1), продольная скорость электронов с энергией 100 кэВ и питч-фактором $g = 1,2$ равна $0,4c$, где c — скорость света, время пролёта электронов через пространство взаимодействия $T_t \approx 0,17$ нс. Ширина полосы циклотронного резонанса $\Delta\Omega = 3,8 \cdot 10^{10}$ рад/с, следовательно, условие (1) выполнено, и приближение фиксированной продольной структуры поля справедливо.

Будем считать, что внешний сигнал имеет такую же поперечную структуру поля, как и рабочая мода, и поступает в резонатор из выходного тракта. В рассматриваемом гиротроне ширина линии каждой моды ω_s/Q_s мала по сравнению с расстройкой по частоте между модами (см. рис. 2), а полоса захвата (т. е. область частот внешнего сигнала ω , при которых он может захва-

тять частоту рабочей моды) мала по сравнению с шириной резонансной кривой [1]. Поэтому внешний сигнал в отсутствие электронного пучка воздействует только на рабочую моду, а на остальные моды он влияет лишь вследствие нелинейности электронной восприимчивости. Уравнение возбуждения рабочей моды было получено в работах [8, 9] путём обобщения стационарного уравнения, связывающего амплитуду поля в резонаторе гиротрона с амплитудой поступающей из выходного волноводного тракта монохроматической волны [10], на случай нестационарных процессов. Уравнения возбуждения остальных мод и уравнение движения электронов можно записать в традиционном для многомодовых гиротронов виде [11, 12]. Предполагается, что входные параметры электронного пучка (ток, ускоряющее напряжение, начальный пичфактор электронов и расстройка по магнитному полю и напряжению) медленно меняются по сравнению с временем пролёта электронов через пространство взаимодействия в соответствии со сценарием включения, показанным на рис. 3, так что на каждом шаге интегрирования по времени эти параметры можно считать постоянными. В результате самосогласованная система уравнений, описывающих взаимодействие мод в гиротроне при наличии внешнего сигнала, имеет вид

$$\frac{2Q_s}{\bar{\omega}_s} \frac{dF_s}{dt} + \left[1 + i \frac{2Q_s}{\bar{\omega}_s} (\bar{\omega}_s - \omega_s) \right] F_s - 2i\delta_{s0} B_{in} = iI_s F_s \chi_s, \quad (2)$$

$$\frac{dp}{d\zeta} + i \frac{\tilde{a}_\perp^2}{\tilde{a}_z} (\tilde{\Delta} + |p|^2 - 1) p = i \frac{\gamma}{\tilde{\gamma} \tilde{a}_\perp \tilde{a}_z} \sum_s F_s f(\zeta) \exp(i\Phi_s) \quad (3)$$

с начальными и граничными условиями

$$F_s(t=0) = F_s^{(0)}, \quad p(\zeta=0) = \exp(i\vartheta_0), \quad 0 \leq \vartheta_0 < 2\pi. \quad (4)$$

Здесь $F_s = A_s \exp(i\varphi_s)$ — безразмерная комплексная амплитуда поля s -й моды, которая связана с электрическим полем \mathbf{E} этой моды соотношением

$$\mathbf{E} = \text{Re} \left\{ -i\gamma\beta_{\perp 0}^3 \frac{mc^2}{e} \sum_s f(z) F_s(t) \exp(i\bar{\omega}_s t) [\mathbf{z}_0, \nabla_\perp \Psi_s(\mathbf{r})] \right\},$$

где $\Psi_s(\mathbf{r}) = J_{m_s}(\kappa_{\perp s} r) \exp(-im_s \psi)$ — мембранная функция, $J_{m_s}(\kappa_{\perp s} r)$ — функция Бесселя m_s -го порядка, $\bar{\omega}_s$ — опорная частота s -й моды, (z, r, ψ) — цилиндрическая система координат в пространстве взаимодействия, \mathbf{z}_0 — орт оси z , $\kappa_{\perp s}$ — поперечное волновое число s -й моды, m и $e > 0$ — масса электрона и элементарный заряд соответственно. Для нахождения функции $f(\zeta) = |f(\zeta)| \exp[i\alpha(\zeta)]$, описывающей продольную структуру поля (рис. 1), и собственной комплексной частоты резонатора ω_{compl} решалось уравнение неоднородной струны в пустом (без электронного пучка) резонаторе гиротрона: $d^2 f/dz^2 + h^2 f = 0$, где $h(z) = \sqrt{(\omega_{\text{compl}}^2 - \omega_c^2)/c^2 -$

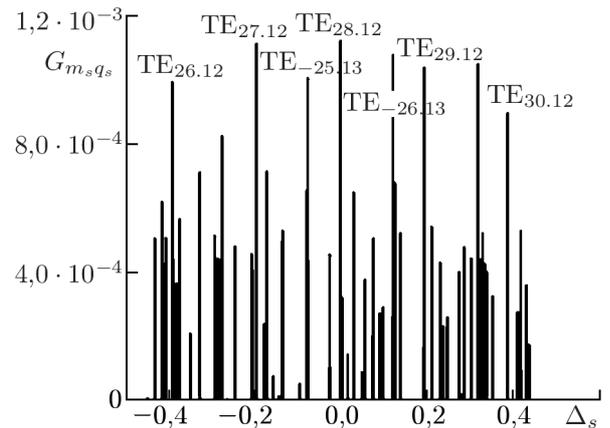


Рис. 2. Коэффициенты связи с электронным пучком для мод, близких по частоте к рабочей моде $TE_{28,12}$, в зависимости от безразмерной расстройки Δ_s между собственной частотой каждой из мод и частотой рабочей моды: $\Delta_s = (2/\beta_\perp^2)(\omega_s/\omega_0 - 1)$, где $\beta_\perp = v_\perp/c$, v_\perp — установившееся значение поперечной скорости электронов на входе в пространство взаимодействия

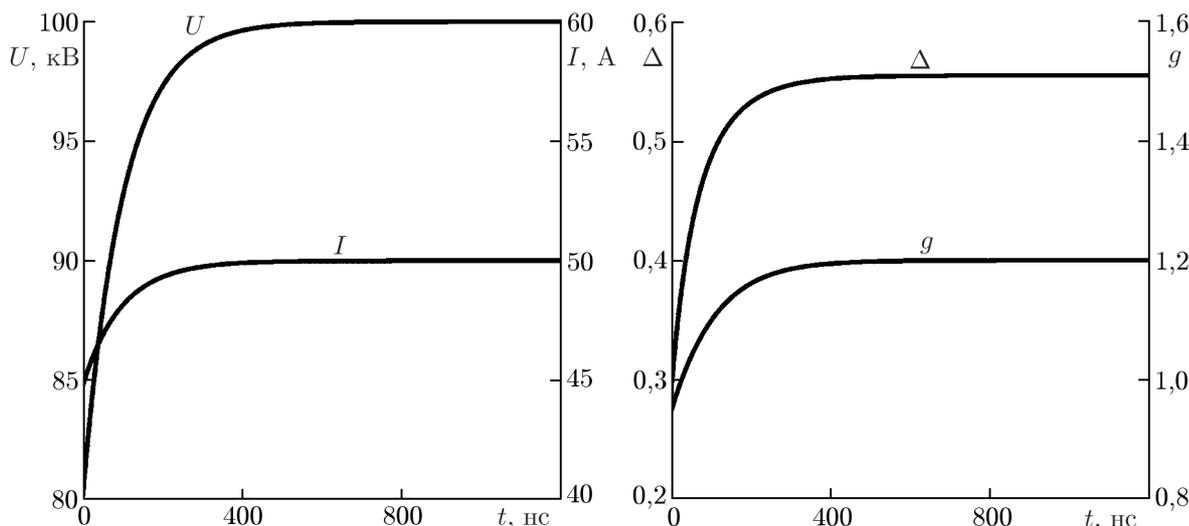


Рис. 3. Временные зависимости напряжения U , тока I , питч-фактора g и расстройки циклотронного резонанса Δ в процессе включения гиротрона

продольное волновое число, $\omega_c(z)$ — критическая частота рабочей моды в волноводе сравнения [13]. Предполагалось, что продольная структура всех мод одинакова. В уравнении (2) δ_{s0} — символ Кронекера, $B_{in} = B \sqrt{h_0} / d\bar{f}/dz |_{z=z_{ex}}$ — безразмерная амплитуда поля внешнего сигнала, заданного формулой

$$\mathbf{E}_{ex} = \text{Re} \left\{ -i\gamma\beta_{\perp 0}^3 [mc^2 / (e \sqrt{h_0})] B \exp(i\omega t) [\mathbf{z}_0, \nabla_{\perp} \Psi_0(\mathbf{r})] \right\}$$

в сечении $z = z_{ex}$ выходного волновода. Выбор этого сечения, а также связь величин B и B_{in} подробно обсуждались в работах [9, 10]. Функция $\bar{f}(z)$ является решением уравнения неоднородной струны в пустом резонаторе на действительной резонансной (т. е. соответствующей максимальному отношению полей внутри и снаружи резонатора) частоте ω_0 , $h_0 = \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_c^2) / c^2}$ — соответствующее резонансной частоте продольное волновое число, \bar{h}_0 — его значение в сечении $z = z_{ex}$, расположенном в выходном волноводе в том месте, где функция $\bar{f}(z)$ обращается в нуль. Вблизи этого сечения поле, с одной стороны, представляет собой сумму встречных излучённой и приходящей извне волн в соответствии с приближением Венцеля—Крамерса—Бриллюэна (ВКБ-приближением):

$$F_0 f \approx \frac{A}{\sqrt{h_0}} \exp(-i\phi) + \frac{B}{\sqrt{h_0}} \exp(i\phi), \tag{5}$$

где $\phi(z) = \int_{z_{ex}}^z h_0 dz$, а с другой — удовлетворяет уравнению неоднородной струны. Для рассматриваемого резонатора (см. рис. 1) $z_{ex} = 52$ мм. Очевидно, что перечисленным требованиям удовлетворяют несколько сечений в выходном волноводе, однако различия величины нормы $\int_0^{z_{ex}} |\bar{f}|^2 dz$, вычисленной для разных сечений, не превышают погрешности используемого приближённого метода возмущений. Как показано в работе [9], отношение величины B_{in} к безразмерной амплитуде $B / \sqrt{h_0}$ приходящей извне волны в выходном сечении $z = z_{ex}$ имеет такое же значение, как отношение амплитуд полей внутри и снаружи резонатора (F_0 и $A / \sqrt{h_0}$ соответственно) в автономном режиме. Следовательно, при малых величинах внешнего сигнала амплитуды полей внутри резонатора связаны с отношением мощностей внешней (P_{ext}) и излучённой (P_{out}) волн в выходном волноводе выражением $|B_{in} / F_0| = \sqrt{P_{ext} / P_{out}}$. Аналогичные выражения приведены в работах [1] (формулы (1), (3)) и [14]. При расчётах мощность внешнего сигнала задавалась в процентах от

мощности излучения автономного гиротрона, вычисленной в одномодовом режиме при оптимальных для достижения высокого КПД параметрах тока пучка и расстройки ($I = 100$ А, $\Delta = 0,56$). В (2)–(4) $p = p_{\perp}/(p_{\perp}|_{z=0}) \exp\{i[\vartheta + (m_0 - 1)\psi]\}$ — безразмерный поперечный импульс электрона, p_{\perp} — модуль поперечного импульса электрона, $\vartheta = \int_0^z \omega_H/(c\beta_z) dz' + \theta^{(\text{in})} - \bar{\omega}_0 t$, $\vartheta \in [0, 2\pi)$ — фаза циклотронного вращения электрона относительно фазы рабочей моды, $\vartheta|_{z=0} = \theta^{(\text{in})} - \bar{\omega}_0 t = \vartheta_0$ — её значение на входе в пространство взаимодействия,

$$\chi_s = \frac{1}{F_s} \frac{\tilde{I}}{I} \frac{\tilde{a}_{\perp}}{\tilde{a}_z} \int_0^{\zeta_{\text{ex}}} f^*(\zeta) \langle \langle p \rangle_{\vartheta_0} \exp(-i\Phi_s) \rangle_{\psi} d\zeta \quad (6)$$

— электронная восприимчивость для s -й моды, $\zeta = \beta_{\perp 0}^2/(2\beta_{z0}) \omega_0 z/c$ — безразмерная продольная координата, γ — релятивистский фактор электрона; β_{\perp} и β_z — нормированные на скорость света поперечная и продольная компоненты скорости электрона при $\zeta = 0$ после процесса включения ускоряющего напряжения. Опорная частота рабочей моды выбрана равной частоте внешнего сигнала ω , опорные частоты других мод $\bar{\omega}_s = \omega + \omega_s - \omega_0$, так что для всех мод разность опорной и собственной частот одинакова:

$$\bar{\omega}_s - \omega_s = \omega - \omega_0. \quad (7)$$

Угловые скобки в (6) означают усреднение по начальной фазе циклотронного вращения ϑ_0 и азимутальной координате ведущих центров электронных орбит ψ . Коэффициенты в (3) и (6), обозначенные тильдой, соответствуют значениям входных параметров, меняющимся в процессе включения ускоряющего напряжения, а без этого обозначения — установившимся значениям входных параметров по окончании процесса включения. Кроме того, $\tilde{a}_{\perp} = \tilde{\beta}_{\perp}/\beta_{\perp}$, $\tilde{a}_z = \tilde{\beta}_z/\beta_z$,

$$\Phi_s = (\bar{\omega}_s - \bar{\omega}_0)t - (m_s - m_0)\psi \quad (8)$$

— разность фаз полей s -й и рабочей мод, $\tilde{\Delta} = (2/\tilde{\beta}_{\perp}^2) [1 - \omega_H \gamma / (\tilde{\gamma} \omega_0)]$ — безразмерная расстройка между циклотронной частотой электронов ω_H на входе в резонатор и собственной частотой рабочей моды (эта расстройка меняется в процессе включения ускоряющего напряжения), $I_s = 2,35 \cdot 10^{-4} I[A] [Q_s G_{m_s q_s} / (\gamma \beta_{\perp 0}^2 \beta_{z0})] / N$ — безразмерный ток [11, 12], $N = \int_0^{\zeta_{\text{ex}}} |f(\zeta)|^2 d\zeta$ — норма волны, $G_{m_s q_s} = J_{m_s-1}(\nu_{m_s q_s} R_b / R_r) / (\nu_{m_s q_s}^2 - m_s^2)$ — коэффициент связи между электронным пучком и модой $\text{TE}_{m_s q_s}$, m_s — азимутальный, а q_s — радиальный индексы моды, $\nu_{m_s q_s}$ — q_s -й нуль производной функции Бесселя $J'_{m_s}(\xi)$, R_b — радиус трубчатого электронного пучка, R_r — радиус резонатора.

Важно отметить, что выбор опорной частоты каждой моды вблизи собственной «холодной» частоты этой моды (7) позволяет пренебречь изменением комплексных амплитуд мод за время пролёта электронов, даже если отстройка собственных частот мод друг от друга сравнима с обратным временем пролёта. Однако фазы полей мод (8) могут сильно отличаться для электронов, оказывающихся в один и тот же момент времени t в разных точках пространства взаимодействия. Поэтому при интегрировании уравнений движения (3) фазы (8) были представлены в виде

$$\Phi_s = (1/\tilde{a}_z) \Delta_s \zeta + (\bar{\omega}_s - \bar{\omega}_0)t_0 - (m_s - m_0)\psi, \quad (9)$$

где $t_0 = t - 2\bar{\zeta}/(\beta_{\perp 0}^2 \tilde{a}_z \omega_0)$ — время влёта электрона в пространство взаимодействия, зависящее от координаты $\bar{\zeta}$, до которой электрон долетит к моменту времени t , $\Delta_s = (2/\beta_{\perp 0}^2) (\omega_s/\omega_0 - 1)$ — безразмерная расстройка между реальными частями собственных частот s -й и рабочей мод. В соответствии с предложенным в работе [9] алгоритмом численного моделирования все электроны,

оказывающиеся в определённый момент времени в пространстве взаимодействия, разбивались на фракции с разным временем влёта.

При численном решении системы уравнений (2) и (3) рассматривалось взаимодействие рабочей моды $TE_{28.12}$ гиротрона на частоте 170 ГГц с соседними по частоте модами, имеющими достаточно большие коэффициенты связи (рис. 2). Это моды эквидистантного спектра $TE_{26.12}$, $TE_{27.12}$, $TE_{29.12}$, $TE_{30.12}$ и моды $TE_{-25.13}$, $TE_{-26.13}$, в которых направление вращения полей встречное по отношению к вращению электронов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование проводилось для многомодового гиротрона с параметрами, близкими к параметрам прототипа гиротрона для ITER, разработанного в ИПФ РАН [15]: рабочая мода $TE_{28.12}$ с частотой 170 ГГц и добротностью $Q_0 = 1370$, радиус электронного пучка 8,27 мм, радиус резонатора 20,77 мм. На рис. 4 показаны зоны одночастотной одномодовой генерации на плоскости параметров тока пучка I и расстройки Δ для режимов автономной генерации и захвата внешним сигналом с уровнем мощности 5% от мощности излучения. Зоны построены для разного числа взаимодействующих мод, учитываемых в расчётах. При малых расстройках левая граница зоны свободной генерации в одномодовом гиротроне совпадает с кривой стартового тока. Для обоих режимов размеры зон уменьшаются с ростом числа взаимодействующих мод, если взаимодействующие моды не слишком далеко отстоят по частоте от рабочей моды. Как следует из рис. 4, крайние по частоте моды ($TE_{26.12}$ и $TE_{30.12}$) не оказывают влияния на размеры зон, хотя и могут возбуждаться при некоторых параметрах. Оценки показывают, что эти моды лежат за пределами полосы циклотронного резонанса. Действительно, ширина зон одночастотной генерации $\delta\Delta$ при учёте только рабочей моды составляет, как видно из рис. 4, примерно 0,3, что хорошо соответствует рассчитанной в разделе 1 ширине полосы циклотронного резонанса $\Delta\Omega$ (величина $\delta\Delta$ связана с $\Delta\Omega$ соотношением $\delta\Delta = 2\Delta\Omega/(\beta_{\perp 0}^2\omega)$). Расстройка Δ_s между рабочей модой и соседними модами, участвующими во взаимодействии, составляет от 0,1 для мод встречного вращения до 0,4 для крайних по частоте мод (см. рис. 2). Поскольку нормировка величин Δ и Δ_s одинакова, можно утверждать, что все моды, кроме крайних по частоте, лежат в полосе циклотронного резонанса. При больших расстройках Δ часть зон захвата находится в области жёсткого самовозбуждения генерации (ниже кривой стартового тока b), где возможно достижение высоких значений КПД. Параметры гиротрона попадают в области жёсткого самовозбуждения в процессе включения тока и ускоряющего напряжения. В начальный момент времени параметры гиротрона лежат в области мягкого самовозбуждения рабочей моды либо в области отсутствия генерации. По мере роста напряжения меняется расстройка Δ и условия возбуждения становятся оптимальными последовательно для разных паразитных мод, которые при захвате подавляются внешним сигналом. Как известно [7, 16, 17], при захвате частоты генератора с жёстким самовозбуждением возможны два режима: синхронизованные автоколебания и вынужденные колебания с малой амплитудой, соответствующие регенеративному усилению внешнего сигнала с низким КПД. В расчётах наблюдался переход к регенеративным режимам усиления с малым КПД при выходе из зон захвата в области больших расстроек, как и в работах [7, 17]. Такие режимы, как и режимы с малыми КПД в области мягкого самовозбуждения, соответствующие параметрам слева от кривой 5 на рис. 4, не представляют практического интереса. Небольшое отличие зон одночастотной генерации на рис. 4 и в предыдущей статье [9] связано с выбором в данной работе менее жёсткого ограничения возможных флуктуаций частоты рабочей моды внутри зоны: в работе [9] допускались флуктуации частоты рабочей моды, не превышающие 0,2 МГц, в данной статье — до 1 МГц.

Поперечный КПД при захвате частоты многомодового гиротрона может достигать существенно более высоких значений (выше 80%), чем в режиме свободной автономной генерации. Этот эффект можно объяснить увеличением амплитуды поля в резонаторе гиротрона при захвате его частоты. Как показывают численные расчёты, в автономном гиротроне при взаимодействии пяти или семи мод максимальное значение поперечного КПД составляет около 60%. В режиме захвата частоты гиротрона с пятью или семью взаимодействующими модами при токе пучка 60 А достигается существенно более высокий поперечный КПД (более 80%), что связано со смещением зон захвата в область оптимальных по КПД расстроек. Такие высокие значения КПД (более 80%) могут достигаться в автономном режиме только для одномодового гиротрона при токе более 100 А. Оптимизированный по току и расстройке Δ поперечный КПД растёт при увеличении мощности внешнего сигнала P_{ext} , если эта мощность не слишком велика (не превышает значений $P_{\text{ext}}/P_{\text{opt}} \sim 9\%$, см. рис. 5).

Взаимодействие мод полностью меняет характер зависимости конфигурации зон захвата от мощности внешнего сигнала. В отсутствие паразитных мод (т. е. при учёте только одной рабочей моды) для достаточно больших токов выход из режима захвата на левой границе зон обусловлен возникновением биений частоты. При этом, как и в классической задаче о захвате частоты одномодового генератора, ширина зон захвата растёт с увеличением мощности внешнего сигнала (рис. 6а). При малых токах левая граница зон захвата соответствует нулевому КПД. Появление «выступов» в левой части зон захвата, таким образом, связано с разными механизмами выхода из режима захвата на верхней и нижней границах «выступов». На правой границе зон, как уже отмечалось выше, срыв генерации обусловлен переходом в область регенеративного усиления внешнего сигнала с малыми КПД.

В многомодовом гиротроне выход из зон захвата обусловлен возбуждением паразитных мод. Размеры зон захвата при любых токах меняются немонотонно при возрастании мощности сигнала (рис. 6б), что объясняется наличием двух механизмов влияния рабочей моды на соседние моды. Возрастание мощности внешнего сигнала и, соответственно, амплитуды рабочей моды приводит к тому, что, с одной стороны, рабочая мода может подавлять паразитные моды, а с другой — из-за нелинейности электронной восприимчивости при увеличении амплитуды рабочей моды мо-

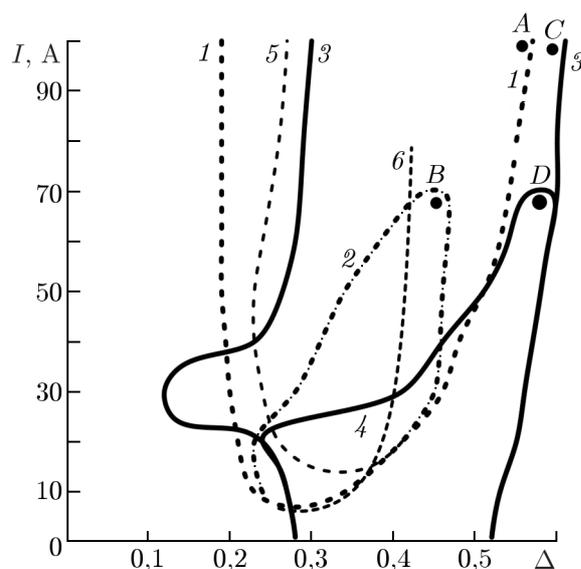


Рис. 4. Зоны захвата частоты гиротрона внешним сигналом (сплошные кривые) и зоны одночастотной генерации на рабочей моде в автономном режиме (штриховые кривые) для гиротрона с рабочей модой $TE_{28,12}$ и разным числом взаимодействующих мод: для одной моды $TE_{28,12}$, пяти мод ($TE_{28,12}$, $TE_{27,12}$, $TE_{29,12}$, $TE_{-25,13}$, $TE_{-26,13}$) и семи мод, отмеченных на рис. 2. Кривые 1 ограничивают область одномодовой генерации при учёте одной рабочей моды, кривая 2 — при учёте пяти или семи мод, кривые 3 — зону захвата при учёте одной моды, кривая 4 — при учёте пяти или семи мод. Слева от кривой 5 лежит область, где поперечный КПД в автономном режиме при учёте одной моды меньше 20%. Кривая 6 соответствует стартовому току. Кривая 1 в области малых расстроек совпадает с кривой 6. Показаны точки, где достигается максимальный поперечный КПД: A — 79% в автономном режиме при учёте одной моды, B — 63% при учёте пяти или семи мод, C — 85% в режиме захвата при учёте одной моды, D — 82% при учёте пяти или семи мод

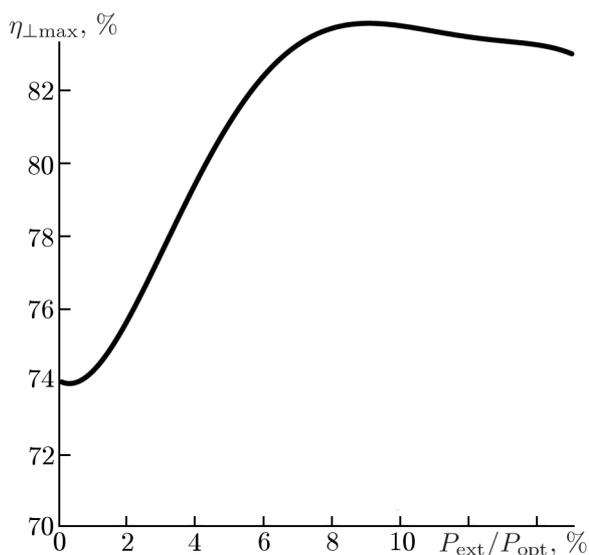


Рис. 5. Зависимость максимального поперечного КПД от мощности внешнего сигнала P_{ext} , нормированной на мощность излучения P_{opt} , для случая взаимодействия семи мод, отмеченных на рис. 2

зоны на рис. 4, при токах пучка около 70 А выход из зоны захвата обусловлен возбуждением моды $TE_{27,12}$ на обеих границах зоны. При меньших токах (порядка 40 А) на правой границе также возбуждается паразитная мода $TE_{27,12}$, а на левой границе возникают колебания частоты

гут возбуждаться паразитные моды и подавлять рабочую моду. Первый механизм (подавление рабочей модой других мод) имеет место при малых значениях мощности внешнего сигнала (примерно до $P_{ext}/P_{opt} \sim 2\%$), при этом ширина зоны захвата с ростом мощности внешнего сигнала растёт. Второй механизм присущ режимам с большими мощностями внешнего сигнала ($P_{ext}/P_{opt} > 2 \div 3\%$), при этом ширина зоны захвата с ростом мощности сигнала уменьшается. В результате зависимость ширины зон от мощности внешнего сигнала P_{ext} имеет максимум при $P_{ext}/P_{opt} \sim 1 \div 3\%$ (рис. 7). С ростом мощности внешнего сигнала происходит смещение зон в область больших расстроек и большего КПД (рис. 6б).

Выход из зон захвата и одночастотной автономной генерации в многомодовом гиротроне на левой и правой границах зон связан с возбуждением какой-либо одной паразитной моды. В частности, для параметров, при которых построены

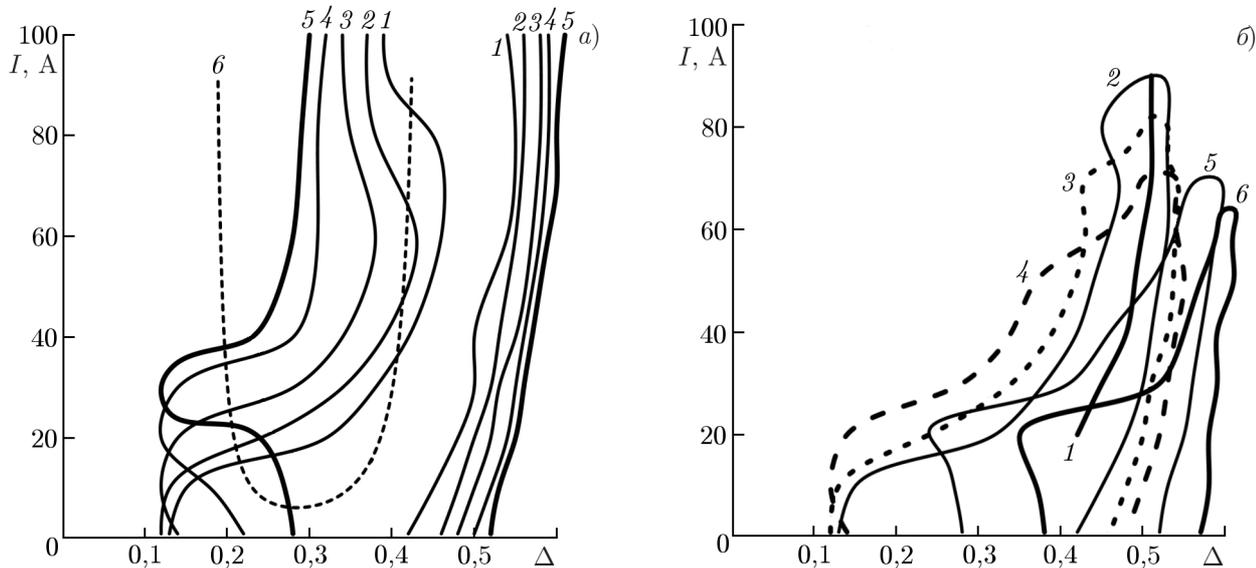


Рис. 6. Зоны захвата при разных уровнях мощности внешнего сигнала: (а) в гиротроне с одной модой $TE_{28,12}$: кривые 1 ограничивают зону захвата при $P_{ext}/P_{opt} = 0,5\%$, 2 — при $P_{ext}/P_{opt} = 1\%$, 3 — при $P_{ext}/P_{opt} = 2\%$, 4 — при $P_{ext}/P_{opt} = 3,5\%$, 5 — при $P_{ext}/P_{opt} = 5\%$, кривая 6 соответствует стартовому току; (б) в гиротроне с пятью или семью взаимодействующими модами, отмеченными на рис. 2, кривая 1 соответствует зоне захвата при $P_{ext}/P_{opt} = 0,01\%$, 2 — при $P_{ext}/P_{opt} = 0,5\%$, 3 — при $P_{ext}/P_{opt} = 1\%$, 4 — при $P_{ext}/P_{opt} = 2\%$, 5 — при $P_{ext}/P_{opt} = 5\%$, 6 — при $P_{ext}/P_{opt} = 10\%$

рабочей моды, превышающие 1 МГц. Вблизи середин верхних границ зоны захвата и зоны одночастотной генерации, где мала электронная перестройка частоты и спектр мод с большой точностью близок к эквидистантному, при выходе из зоны захвата наблюдается возбуждение боковых сателлитов $TE_{27.12}$ и $TE_{29.12}$, симметрично отстоящих по частоте от рабочей моды (рис. 8а). Подобные процессы происходят при захвате частоты генератора с квадратичной нелинейностью активной среды [18]. При этом выполнены соотношения для частот и азимутальных индексов

$$2\omega_0 = \omega_1 + \omega_{-1}, \quad 2m_0 = m_1 + m_{-1}, \quad (10)$$

аналогичные закону сохранения энергии и импульса при 4-фотонном распаде двух квантов исходной волны на два кванта боковых сателлитов (здесь ω_1 , ω_{-1} и m_1 , m_{-1} — частоты и азимутальные индексы соседних мод эквидистантного спектра $TE_{29.12}$ и $TE_{27.12}$ соответственно). При захвате частоты сигналом с относительной мощностью 5% распад на сателлиты происходит при токах пучка выше 70 А (рис. 8а). В автономном режиме также наблюдается распад на боковые сателлиты, но при гораздо больших токах ($I = 100$ А и выше, см. рис. 8б).

На рис. 9 на плоскости расстройки Δ и частоты внешнего сигнала построены зоны захвата частоты при различной мощности внешнего сигнала. Для сравнения показана перестройка частоты генерации в автономном режиме. Как видно из рис. 9, полоса перестройки частоты в режиме захвата может в несколько раз превышать полосу перестройки частоты автономных колебаний.

Было исследовано изменение поперечного КПД и фазы колебаний на рабочей моде относительно фазы внешнего сигнала при вариациях ускоряющего напряжения (рис. 10). В реальных экспериментах могут происходить медленные (по сравнению с длительностью переходных процессов в резонаторе гиротрона) технические флуктуации напряжения источника питания в пределах около 2 кВ. Как показали расчёты, для оптимальных параметров тока и расстройки такие изменения ускоряющего напряжения не приводят к существенному снижению КПД и изменению фазы излучения: в интервале напряжений от 99 до 101 кВ изменение фазы составило примерно 0,2, при этом поперечный КПД превышал 75%.

ВЫВОДЫ

В работе продемонстрирован ряд особенностей и преимуществ режима захвата частоты колебаний многомодового гиротрона внешним монохроматическим сигналом по сравнению с режимом свободной генерации. Показано, что основным фактором, препятствующим установлению одномодовых колебаний со стабильной частотой, является возбуждение паразитных мод. Для многомодового гиротрона на частоте 170 ГГц с мощностью 2 МВт построены зоны захвата — области колебаний на рабочей моде с частотой внешнего сигнала — в зависимости от параметров гиротрона

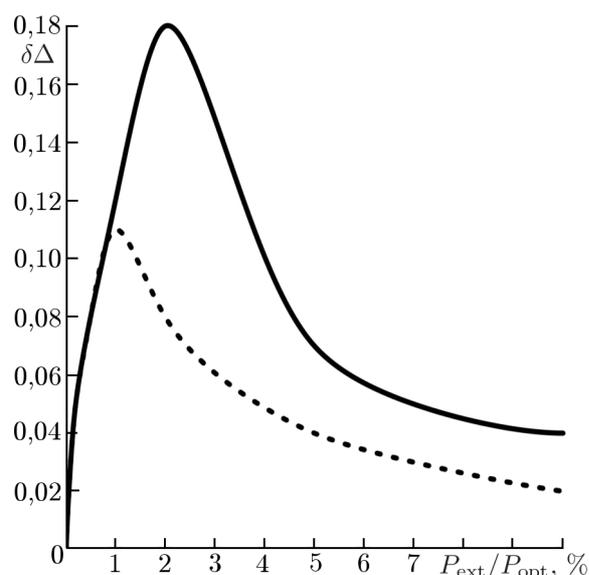


Рис. 7. Зависимость ширины зоны захвата $\delta\Delta$ при токе пучка 50 А (сплошная кривая) и 60 А (пунктирная кривая) от уровня мощности внешнего сигнала в гиротроне с семью взаимодействующими модами, отмеченными на рис. 2

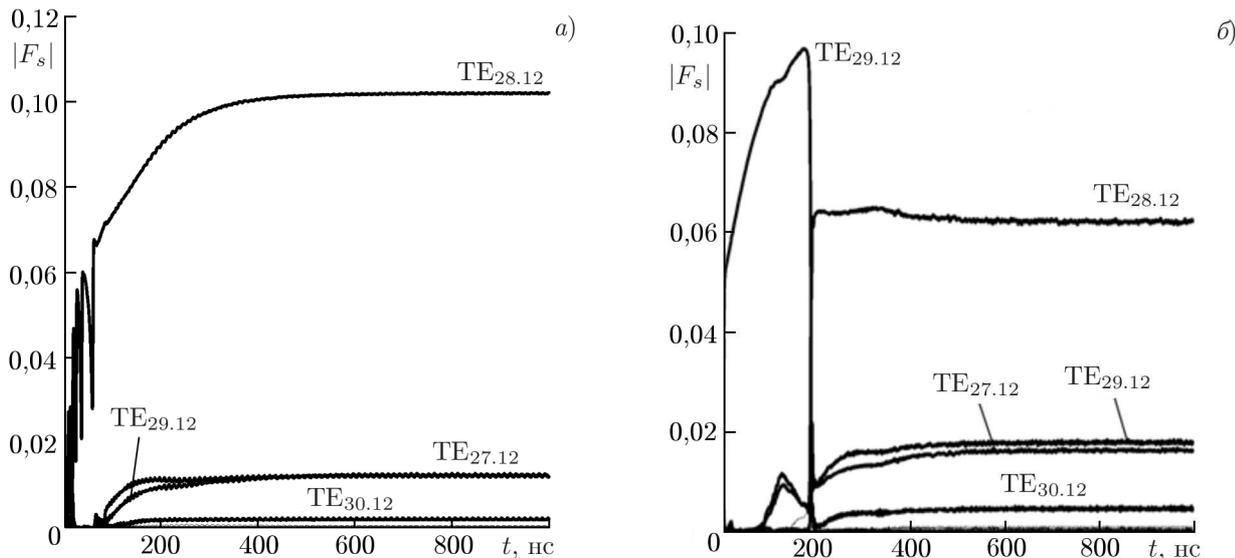


Рис. 8. Динамика безразмерной амплитуды боковых сателлитов рабочей моды (а) при токе $I = 75$ А и расстройке $\Delta = 0,5$ в гиротроне с уровнем мощности внешнего сигнала $P_{ext}/P_{opt} = 5\%$ и (б) в автономном гиротроне при токе $I = 100$ А и расстройке $\Delta = 0,4$

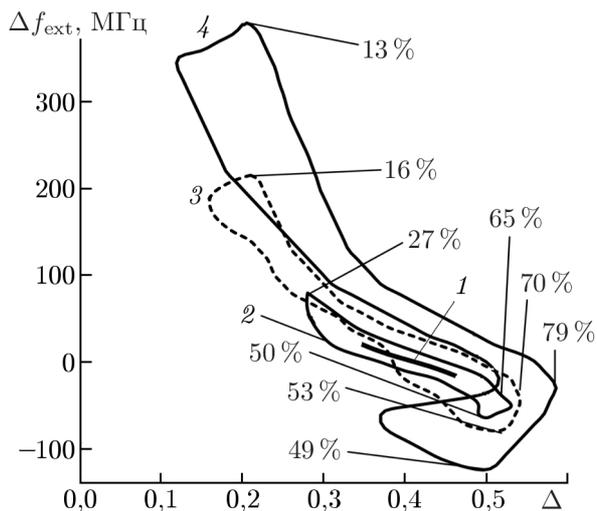


Рис. 9. Зоны захвата частоты гиротрона в условиях взаимодействия семи мод, отмеченных на рис. 2, на плоскости расстройки Δ и отстройки частоты внешнего сигнала от «холодной» частоты рабочей моды $\Delta f_{ext} = (\omega - \omega_0)/(2\pi)$ при токе пучка $I = 50$ А. Кривая 1 соответствует перестройке частоты генерации в автономном режиме, 2 — зоне захвата при $P_{ext}/P_{opt} = 0,25\%$, 3 — при $P_{ext}/P_{opt} = 1\%$, 4 — при $P_{ext}/P_{opt} = 5\%$. Для каждой зоны показаны значения поперечного КПД

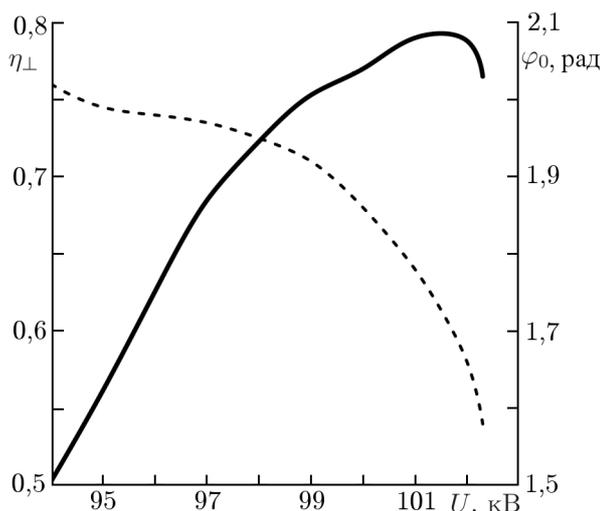


Рис. 10. Зависимость поперечного КПД и фазы колебаний на рабочей моде от установившегося ускоряющего напряжения при $I = 50$ А и $P_{ext}/P_{opt} = 5\%$ для семи мод, отмеченных на рис. 2. При ускоряющем напряжении $U = 100$ кВ в конце процесса включения источника питания расстройка $\Delta = 0,527$

и внешнего сигнала. Показано, что размеры зон уменьшаются с ростом числа взаимодействующих мод, а зависимость ширины зон по расстройке Δ от мощности сигнала является немонотонной.

Значения поперечного КПД в режиме захвата могут быть существенно выше (более 80%), чем в режиме автономной генерации многомодового гиротрона. Ширина перестройки частоты генерации в режиме захвата в несколько раз превышает ширину перестройки частоты в автономном режиме. Показано, что при флуктуациях напряжения источника питания в пределах практической нестабильности (1÷2 кВ) КПД остаётся высоким, а фаза излучения меняется незначительно.

Авторы благодарят Н. М. Рыскина и А. С. Седова за полезные замечания и обсуждения. Работа поддержана Российским научным фондом (грант 14–29–00192).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ергаков В. С., Моисеев М. А., Хижняк В. И. // Радиотехника и электроника. 1978. № 12. С. 2591.
2. Nusinovich G. S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press. 2004. 335 p.
3. McCurdy A. H., Armstrong C. M. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61, No. 20. P. 2316.
4. Novozhilova Yu. V., Ischenko A. S. // J. Infrared Millimeter and Terahertz Waves. 2011. V. 32, No. 12. P. 1394.
5. Chirkov A. V., Denisov G. G., Kuftin A. N. // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106, No. 26. Art. no. 263501.
6. Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Zotova I. V. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22, No. 3. Art. no. 033101.
7. Зотова И. В., Гинзбург Н. С., Денисов Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 9. С. 759.
8. Бакунин В. Л., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, № 9. С. 41.
9. Бакунин В. Л., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 12. С. 999.
10. Ковалёв Н. Ф., Новожилова Ю. В., Петелин М. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 875.
11. Моисеев М. А., Нусинович Г. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1974. Т. 17, № 11. С. 1709.
12. Nusinovich G. S. // Int. J. Electron. 1981. V. 51, No. 4. P. 457.
13. Каценеленбаум Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: АН СССР. 1961. 216 с.
14. Nusinovich G., Danly B., Levush B. // Phys. Plasmas. 1997. V. 4, No. 2. P. 469.
15. Myasnikov V., Agapova M., Kuftin A., et al. // Proc. 38th Int. Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-Thz 2013). Mainz on the Rhine, Germany, 1–6 Sept. 2013. TU.1–6.
16. Ланда П. С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М.: Наука, 1980. 360 с.
17. Yakunina K. A., Kuznetsov P., Ryskin N. M. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22, No. 11. Art. no. 113107.
18. Перегородова Е. Н., Усачёва С. А., Рыскин Н. М. // Нелинейная динамика. 2012. Т. 8, № 5. С. 913

Поступила в редакцию 4 мая 2016 г.; принята в печать 26 сентября 2016 г.

**MODE COMPETITION INFLUENCE ON FREQUENCY LOCKING
OF A MULTIMODE GYROTRON BY A MONOCHROMATIC
EXTERNAL SIGNAL**

V. L. Bakunin, G. G. Denisov, Yu. V. Novozhilova, and A. P. Fokin

We study frequency locking of the gyrotron operating mode by a monochromatic external signal under conditions of competition of several modes. The calculations were performed for a megawatt-power 170-GHz gyrotron with the $TE_{28,12}$ operating mode. Mode interaction of both equidistant and non-equidistant spectra is considered. Frequency mismatch of the modes is comparable to the cyclotron resonance bandwidth. Influence of the external-signal power on the boundaries of the frequency locking zones is studied. The possibility to achieve a high orbital efficiency and broadband frequency tuning in the frequency-locking regime is considered.