

13

## Стабилизация частоты и фазы многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности внешним сигналом

© В.Л. Бакунин, Г.Г. Денисов, Ю.В. Новожилова

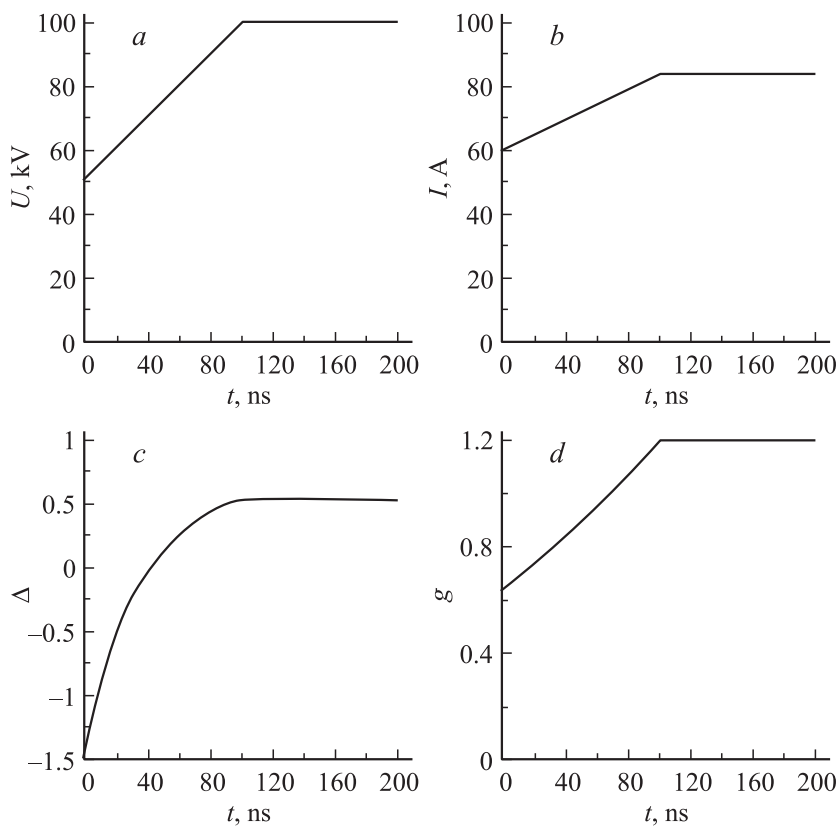
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
Нижегородский государственный университет им Н.И. Лобачевского,  
Нижний Новгород  
E-mail: knightrider7@yandex.ru

Поступило в Редакцию 18 декабря 2013 г.

Для многомодового гиротрона с режимом включения, близким к реальному, численно исследован захват внешним монохроматическим сигналом частоты и фазы колебаний рабочей моды TE<sub>28.12</sub>. Показано, что в широкой области значений магнитного поля и напряжения даже при малой мощности внешнего сигнала происходит установление одномодовой генерации с высоким КПД на частоте внешнего сигнала.

В гиротронах мегаваттного уровня мощности получение одномодовой одночастотной генерации с высоким КПД достаточно проблематично. Это обусловлено сгущением спектра при переходе к модам высокого порядка и жестким режимом возбуждения колебаний рабочей моды. При этом частота генерируемого СВЧ-излучения может быть нестабильной из-за флуктуаций напряжения источника питания. Один из привлекательных вариантов обеспечения селекции мод и стабилизации частоты гиротрона — ввод в резонатор заданного монохроматического сигнала. Синхронизация гиротрона внешним сигналом рассматривалась ранее в [1–5] для упрощенных моделей с малым числом мод и стационарными параметрами электронного пучка на входе в пространство взаимодействия. При этом в [1,2] использовались феноменологические уравнения возбуждения поля внешним сигналом, записанные с точностью до коэффициентов, а полученные в [3] уравнения оказались некорректными из-за неточной формулировки граничных условий.

В данной работе исследована модель гиротрона с рабочей модой TE<sub>28.12</sub> и большим числом паразитных мод (в расчете 17 мод), имеющих достаточно высокий коэффициент связи с электронным пучком.



**Рис. 1.** Зависимость параметров гиротрона от времени в процессе включения: *a* — напряжение электронной пушки, *b* — ток электронного пучка, *c* — безразмерная расстройка циклотронной частоты относительно частоты внешнего сигнала, *d* — питч-фактор.

Предполагается, что внешний сигнал имеет такую же поперечную структуру, как у рабочей моды, и поступает в резонатор из выходного тракта. Входные параметры электронного пучка медленно изменяются в процессе включения: с ростом напряжения, поперечного электрического поля на катоде пушки и вследствие эффекта Шоттки соответственно увеличиваются энергия, питч-фактор электронов и ток (рис. 1).

Уравнение возбуждения рабочей моды получено путем обобщения стационарного уравнения, связывающего амплитуды поля в резонаторе гиротрона и поля внешней падающей на гиротрон монохроматической волны [4], для случая, когда амплитуда поля в резонаторе медленно меняется. Такой подход позволил в приближении фиксированной структуры поля корректно описать влияние внешнего сигнала. Уравнения возбуждения остальных (паразитных) мод, на которые внешний сигнал влияет только через электронный пучок, и уравнение движения электронов записаны в таком же виде, как в [6], однако предполагается, что входные параметры электронов изменяются в соответствии со сценарием включения (рис. 1). В результате исследована следующая самосогласованная система уравнений в обозначениях, традиционных для теории гиротронов:

$$\frac{dF_s}{dt} + F_s \left( \frac{\bar{\omega}_s}{2Q_s} + i(\bar{\omega}_s - \omega_s) - i \frac{\tilde{a}_\perp}{\tilde{a}_z} \frac{\tilde{I}}{I} \chi_s \right) = i \delta_{s0} \frac{\bar{\omega}_s}{Q_s} B_{in},$$

$$\frac{dp}{d\xi} + i \frac{\tilde{a}_\perp^2}{\tilde{a}_z} \left( \tilde{\Delta} + |p|^2 - 1 \right) p = i \frac{\gamma}{\tilde{\gamma} \tilde{a}_\perp \tilde{a}_z} \sum_s F_s f_s(\xi) \exp(i\Psi_s),$$

с начальными и граничными условиями

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

Здесь  $s$  — номер моды, для рабочей моды  $s = 0$ ,  $\delta_{s0}$  — символ Кронекера,  $F_s = A_s \exp(i\varphi_s)$  — комплексная амплитуда поля  $s$ -й моды,  $p$  — безразмерный поперечный импульс электрона,  $\xi = (\beta_\perp^2 / 2\beta_z)(\omega_0 z / c)$  — безразмерная продольная координата,  $f(\xi) = \exp(-3(2\xi/\xi_k - 1)^2)$  при  $0 \leq \xi \leq \xi_k$  — продольная структура поля, которая в рамках рассматриваемой модели считается фиксированной,  $\omega_s$  — собственная частота  $s$ -й моды,  $\bar{\omega}_s$  — опорная частота  $s$ -моды. Удобно выбрать опорную частоту для рабочей моды совпадающей с частотой внешнего сигнала  $\omega$ , для остальных мод  $\bar{\omega}_s = \omega + \omega_s - \omega_0$ ;  $Q_s$  — добротность  $s$ -й моды;

$$\chi_s = \frac{\omega_s}{2Q_s} \frac{I_s}{F_s} \int_0^{\xi_c} f_s^*(\xi) \langle \langle p \rangle_\vartheta \exp(-i\Psi_s) \rangle_\psi d\xi$$

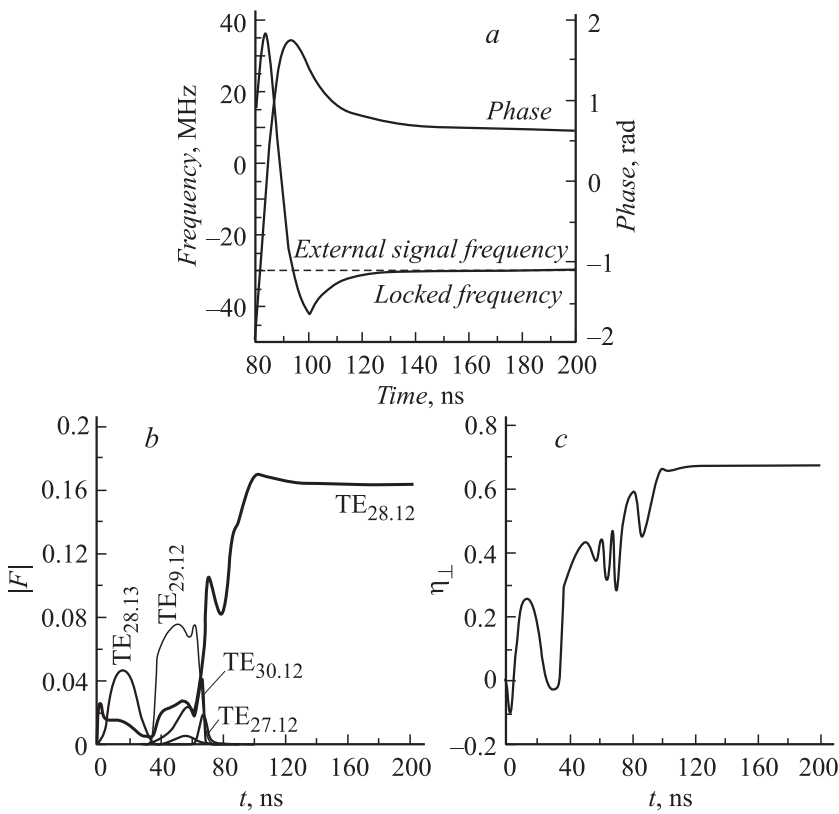
— восприимчивость электронного пучка по отношению к полю  $s$ -й моды. Угловые скобки обозначают усреднение по начальной фазе циклотронного вращения  $\vartheta$  и угловой координате ведущих центров  $\psi$ ;  $\Psi_s = (1/\tilde{a}_z)\Delta_{s0}\xi + (\omega_s - \omega_0)t_0 - (m_s - m_0)\psi$ ;

$\Delta_s = (2/\beta_{\perp}^2)(\omega_s/\omega_0 - 1)$  — безразмерная расстройка опорной частоты  $s$ -й моды относительно рабочей;  $t_0$  — время влета электронов в пространство взаимодействия с ВЧ-полем;  $I_s$  — безразмерный токовый параметр, введенный в [6]. Верхним значком  $\sim$  обозначены входные параметры электронного пучка, изменяющиеся в процессе включения гиротрона:  $\tilde{a}_{\perp} = \tilde{\beta}_{\perp}/\beta_{\perp}$ ,  $\tilde{a}_z = \tilde{\beta}_z/\beta_z$ ;  $\Delta = (2/\beta_{\perp}^2)(1 - \omega_{H0}/\gamma\omega_0^{(c)})$  — стационарная расстройка циклотронной частоты,  $\tilde{\Delta}$  — ее значение в процессе включения;  $\omega_{H0}$  — нерелятивистская циклотронная частота;  $B_{in} = |h(\xi_*)/f'(\xi_*)|B_{ext}$ ,  $B_{ext}$  — амплитуда внешнего сигнала в некотором сечении  $\xi_*$  выходного волновода, способ нахождения этого сечения описан в [4],  $h(\xi_*)$ ,  $f'(\xi_*)$  — продольное волновое число и производная от  $f(\xi)$  в этом сечении<sup>1</sup>.

Для численных расчетов были выбраны параметры, близкие к параметрам прототипа гиротрона для ИТЕР, исследуемого в ИПФ РАН [7]: частота  $f_0 = 170$  GHz, мощность 2 MW, добротность рабочей моды  $Q_0 = 1370$ , энергия электрона 50–100 keV, ток электронного пучка 60–85 A. Заметим, что приближение фиксированной структуры поля справедливо при достаточно большом превышении поля внутри резонатора над полем в выходном волноводе. При указанном значении добротности отношение полей примерно равно 3, что позволяет считать полученные результаты пригодными для качественного описания процесса захвата частоты гиротрона.

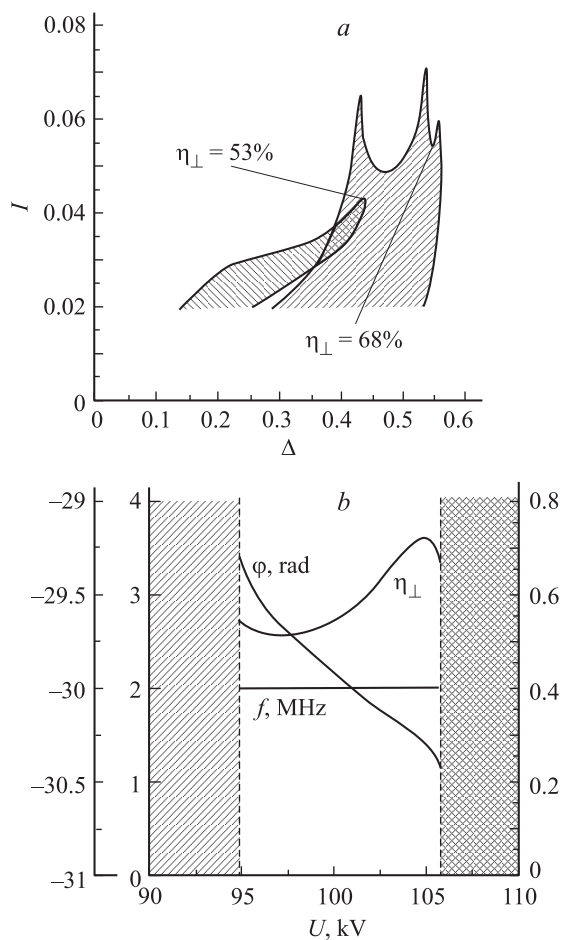
В соответствии с [1,2,8] ширина полосы захвата  $\Delta f \approx f_0 B_{in}/(Q_0 A_0)$  равна примерно 30 MHz при мощности сигнала, составляющей 5% от мощности излучения. Время установления захваченных колебаний, обратно пропорциональное  $\Delta f$ , должно быть около 35 ns, что соответствует численным расчетам: как следует из рис. 2, *a*, захват происходит при  $100 \text{ ns} < t < 135 \text{ ns}$ . При захвате подавляются паразитные моды, и устанавливается генерация на рабочей моде с достаточно высоким орбитальным КПД (рис. 2, *b, c*). Зона одномодовой одночастотной генерации на плоскости параметров „расстройка циклотронной частоты–токовый параметр“ имеет сложную форму (рис. 3, *a*), на правой границе зоны достигается наибольший орбитальный КПД 68%. Зона одномодовой генерации в свободном гиротроне с тем же количеством мод существенно более узкая. Правая часть зоны свободной генерации с высоким КПД существует только для более плавного включения гиротрона, при

<sup>1</sup> Заметим, что в отсутствие внешнего сигнала максимальные стационарные значения полей внутри и снаружи резонатора связаны таким же соотношением, как  $B_{ext}$  и  $B_{in}$ .



**Рис. 2.** Зависимость от времени: *a* — частоты и фазы рабочей моды в случае захвата внешним сигналом; *b, c* — амплитуд рабочей и паразитных мод и КПД генерации в случае захвата рабочей моды внешним сигналом.

этом генерация является многомодовой с 2%-й примесью паразитных мод по мощности. Исследование зависимости захваченных колебаний от напряжения источника показывает, что в широком интервале изменения напряжения, составляющем 10 kV, существенно превышающем пределы изменения напряжения в реальных гиротронах (около 2 kV), частота захваченных колебаний остается стабильной, а КПД достаточно высоким (рис. 3, *b*). Полное изменение фазы рабочей моды в полосе



**Рис. 3.** *a* — зона захваченной одномодовой генерации (штриховка слева направо) для мощности сигнала 2.5% относительно мощности гиротрона в оптимальном режиме, оптимального радиуса трубчатого электронного пучка и линейного сценария включения; зона одномодовой генерации для свободного гиротрона (штриховка справа налево), радиус трубчатого электронного пучка увеличен на 0.4%, сценарий включения — экспоненциальный. *b* — зависимость от рабочего напряжения частоты, фазы и КПД захваченной одномодовой генерации. Область с диагональной штриховкой — одномодовая двухчастотная генерация (биения), с точечной — многомодовая генерация.

захвата составляет  $0.7\pi$ , что несколько меньше величины  $\pi$ , соответствующей асимптотической теории одномодового генератора [1,5,8], из-за возбуждения паразитных мод при включении гиротрона. Слева от полосы захвата (рис. 3, *b*) происходят биения на рабочей моде, справа — многомодовая генерация.

Таким образом, результаты численного исследования многомодового гиротрона мегаваттного уровня мощности демонстрируют возможность эффективной стабилизации частоты внешним сигналом в широкой области параметров гиротрона при одновременном достижении высокого КПД. Стабилизация частоты внешним сигналом представляется перспективной для создания большого числа когерентных источников излучения, например при синхронизации нескольких гиротронов внешним управляющим сигналом, источником которого, в свою очередь, может служить стабилизированный гиротрон.

## Список литературы

- [1] *Ергаков В.С., Мусеев М.А., Хижняк В.И.* // Радиотехника и электроника. 1978. № 12. С. 2591–2599.
- [2] *Nusinovich G.S.* Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2004.
- [3] *Fliflet A.W., Manheimer W.M.* // Phys. Rev. A. 1989. V. 39. N 7. P. 3432–3443.
- [4] *Ковалев Н.Ф., Новожилова Ю.В., Петелин М.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 10–11. С. 875–884.
- [5] *Novozhilova Yu.V., Ischenko A.S.* // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2011. V. 32. P. 1394–1406.
- [6] *Завольский Н.А., Нусинович Г.С., Павельев А.Б.* // Гиротроны. Сб. науч. трудов. Горький: ИПФ АН СССР, 1989. С. 84–112.
- [7] *Myasnikov V.E., Agarova M.V., Kuftin A.N.* et al. // Proc. 38<sup>th</sup> Int. Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-Thz 2013). Mainz on the Rhine, Germany, 2013. TU1–6.
- [8] *Van der Pol* // Philosophical Magazine and Journal of Science. 1927. V. 3. N 7. P. 65–80.