

УДК 621.385.6

## О ВОЗБУЖДЕНИИ ПАРАЗИТНЫХ МОД, РЕЗОНАНСНЫХ С ПЕРВОЙ ГАРМОНИКОЙ ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ, В ГИРОТРОНЕ, РАБОТАЮЩЕМ НА МОДЕ, РЕЗОНАНСНОЙ СО ВТОРОЙ ГАРМОНИКОЙ

В. Е. Запевалов, И. Г. Зарницына, Г. С. Нусинович

Рассмотрена конкуренция между рабочей модой гиротрона, резонансной со второй гармоникой циклотронной частоты, и паразитной модой, возбуждающейся с относительно большим продольным волновым числом в резонансе с первой гармоникой. Определен разнос между критической частотой паразитной моды и циклотронной частотой, при котором стартовый ток этой моды выше стартового тока рабочей моды. При значениях параметров, близких к экспериментальным, проанализированы возможности расширения области устойчивости колебаний рабочей моды.

1. Рабочими модами гиротронов обычно являются моды с малым продольным волновым числом, характеризующиеся высокой добротностью. При работе на этих модах разброс поступательных скоростей электронов слабо влияет на циклотронный резонанс между частицами и высокочастотным полем, что позволяет получать в гиротроне высокий КПД. Спектр таких мод близок к спектру критических частот мод соответствующего волновода.

При работе на основном циклотронном резонансе в качестве рабочей обычно выбирают моду, достаточно удаленную по частоте от остальных, чтобы избежать конкуренции мод. При этом наличие мод, резонансных с высшими гармониками циклотронной частоты  $\omega_H$ , несущественно, так как в слаборелятивистском МЦР стартовые токи мод возрастают с ростом номера гармоники  $n$  пропорционально  $\beta_{\perp}^{-2n}$  [1]. Отсюда следует, что при работе в условиях резонанса высокочастотного поля со второй гармоникой  $\omega_H$  ( $n=2$ ) (и, тем более, при  $n > 2$ ) наличие в спектре критических частот резонатора моды, резонансной с  $\omega_H$ , нежелательно, так как такая паразитная мода может легко самовозбудиться. Однако, даже если в спектре резонатора нет мод, критические частоты которых близки к  $\omega_H$ , определенную опасность в гиротронах, работающих на  $2\omega_H$ , представляют моды, возбуждающиеся с относительно большим продольным волновым числом  $h$  в условиях циклотронного резонанса

$$|\omega_n \pm hv_{\parallel} - \omega_H| \ll \omega_H. \quad (1)$$

В настоящей работе анализируются возможные колебательные режимы гиротрона, в котором для рабочей моды выполняется условие циклотронного резонанса  $\omega_p \approx 2\omega_H$ , а для паразитной моды — условие (1).

2. В предназначенных для освоения субмиллиметрового и коротковолновой части миллиметрового диапазона гиротронах, работающих на  $2\omega_H$  (а также в гиротронах клистронного типа) ток пучка невелик [2]. Поэтому для увеличения добротности (и амплитуды автоколебаний)

в резонаторах этих гиротронов создают закритические сужения на коллекторном и катодном концах, что позволяет считать структуру полей обеих мод фиксированной.

Оценим стартовые токи конкурирующих мод, задавая продольную структуру поля рабочей моды в виде  $f_p(z) = \sin \pi \frac{z}{L}$ , паразитной —

$f_{\pi} = \sin q \pi \frac{z}{L}$  ( $L$  — длина резонатора,  $q$  — число вариаций поля паразитной моды). Будем считать, что функции, описывающие зависимость от угла пролета восприимчивостей электронного потока по отношению к полям обеих мод, являются величинами одного порядка, добротности мод  $Q_s$  можно определить как  $Q_s \approx \frac{4\pi}{q_s} \frac{(L/\lambda_s)^2}{1 - R_1^s R_2^s}$  [3] ( $R_{1,2}^s$  — коэффициенты отражения волн на концах резонатора).

Тогда из линейной теории МЦР-монотрона [1] получаем следующее соотношение между стартовыми токами рабочей и паразитной мод:

$$\frac{I_p^{ct}}{I_{\pi}^{ct}} = \frac{1}{4q_{\perp}^2} \frac{G_{\pi}}{G_p} \frac{1 - R_1^p R_2^p}{1 - R_1^{\pi} R_2^{\pi}}, \quad (2)$$

где  $q_{\perp}$  — отношение поперечной компоненты скорости частиц к скорости света  $c$ , структурные коэффициенты  $G_{p,\pi}$  для гиротронов с аксиально-симметричным рабочим пространством равны

$$G = J_{m \pm n}^2(xR_0) [(v^2 - m^2) J_m^2(v)]^{-1}.$$

Здесь  $x$  — поперечное волновое число,  $R_0$  — радиус центров орбитального вращения электронов,  $m$  — азимутальный индекс моды  $H_{mpq}$ ,  $v$  —  $p$ -й корень уравнения  $J_m(v) = 0$ .

Из (2) видно, во-первых, что с ростом напряжения (пропорционально  $q_{\perp}^2$  в (2)) стартовые токи мод, резонансных с разными гармониками гирочастоты, сравниваются. Кроме того, соотношение (2) позволяет оценить требования к спектру резонатора, исходя из предположения, что паразитная мода со стартовым током, превышающим стартовый ток рабочей моды, не возбуждается. Считая, что частота паразитной моды  $\omega = \sqrt{\omega_{кр}^2 + k^2 c^2}$  равна  $\omega = \omega_{кр} + \tilde{\omega}$ , где  $\tilde{\omega} \ll \omega_{кр} = \omega c$ , из условия  $I_p^{ct}/I_{\pi}^{ct} \leq 1$  находим

$$\left( \frac{\tilde{\omega}}{\omega_{кр}} \right)_{\pi} \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\lambda_{\pi} G_{\pi} (1 - R_1^p R_2^p)}{8q_{\perp}^2 L G_p (1 - R_1^{\pi} R_2^{\pi})} \right]^2. \quad (3)$$

Таким образом, если разнос между критической частотой паразитной моды и циклотронной частотой  $|\omega_H - \omega_{п,кр}| \approx \tilde{\omega}$  удовлетворяет условию (3), то стартовый ток паразитной моды превышает стартовый ток рабочей моды.

Условие (3) является необходимым для того, чтобы первой возбудилась рабочая мода, но не достаточным для того, чтобы возбуждшиеся колебания оставались устойчивыми. Как показано в [4], при появлении колебаний, резонансных с  $2\omega_H$ , область самовозбуждения моды, критическая частота которой близка к  $\omega_H$ , расширяется. Поэтому даже при выполнении условия (3) представляется необходимым анализ конкуренции мод с  $\omega_p \approx 2\omega_H$  и  $\omega_{\pi} \approx \omega_H \pm h\nu_{\parallel}$ . Ниже описан расчет конкуренции таких мод, экспериментально исследованной в [5].

3. Расчет проводился развитым в [6] методом, позволяющим определить влияние параметров многомодового генератора на устойчивость одномодовых колебаний. Вычислялись факторы возбуждения, определяющие (с учетом эффектов насыщения) мощность взаимодействия электронного потока с полями мод: сначала вычислялся фактор возбуждения  $\hat{\Phi}_s$  генерирующей моды, зависящий от амплитуды автоколебаний  $F_s$ , расстройки  $\Delta_s \sim \omega_s - n_s \omega_H$  и продольной структуры моды  $f_s(z)^*$ , и определялась с помощью уравнения баланса [4, 6] соответствующая заданному току  $I$  амплитуда стационарных колебаний  $F_s^{ct}$ . Затем вычислялся фактор возбуждения негенерирующей моды  $\hat{\Phi}_{s'}$  ( $s' \neq s$ ), зависящий не только от расстройки  $\Delta_{s'} \sim \omega_{s'} - n_{s'} \omega_H$  и продольной структуры  $f_{s'}(z)$ , но и (в силу нелинейных свойств электронного потока) от амплитуды  $F_s^{ct}$ , расстройки  $\Delta_s$  и структуры  $f_s(z)$  генерирующей моды. После этого определялась область значений параметров генератора, в которой, согласно условию [4, 6]

$$\hat{\Phi}'_s(F_s^{ct}) > \hat{q} \hat{\Phi}'_{s'}(F_s^{ct}), \quad (4)$$

колебания второй моды не возбуждаются, т. е. генерация  $s$ -й моды устойчива. В (4) параметр  $\hat{q}$  равен  $Q_{\parallel} G_{\parallel} / Q_{\perp} \beta_{\perp}^2 G_{\perp}$  (см. (2)) в случае генерации рабочей моды и  $Q_{\perp} \beta_{\perp}^2 G_{\perp} / G_{\parallel} Q_{\parallel}$  — при генерации паразитной

моды;  $\hat{\Phi}'_{s, s'}$  — реальные части факторов возбуждения, которые при фиксированной структуре полей мод в силу аксиальной симметрии рабочего пространства гиротрона не зависят [7] ни от фаз  $s$ -х мод, ни — при неодинаковых азимутальных индексах мод — от их разности фаз. Как и в [4, 6, 7], система предполагалась достаточно высокодобротной, чтобы можно было пренебречь полем пространственного заряда (при значениях параметров, имевших место в экспериментах [5], условие пренебрежения полем пространственного заряда в гиротроне — условие (5) работы [8] — выполняется с достаточным запасом). Продольная структура рабочей моды аппроксимировалась гауссовой функцией  $f_p(\zeta) = \exp \left\{ - \left[ \frac{2(\zeta - \zeta_0)}{\mu_p} \right]^2 \right\}$  ( $\zeta = \frac{\beta_{\perp}^2 \omega_H z}{2\beta_{\parallel} c}$  — приведенная продольная координата), продольная структура паразитной моды — синусоидой  $f_n(\zeta) =$

$\sin \pi q \frac{\zeta}{\mu_n}$ , причем число вариаций поля  $q$  считалось фиксированным,

что в относительно узкой области  $\left( \frac{\Delta \omega}{\omega} < 2\% \right)$  конкуренции мод допустимо\*\*. Расчетные значения параметров были близки к имевшим место в экспериментах [5]:  $\mu = \frac{\beta_{\perp}^2 \omega_H L_{вз}}{2\beta_{\parallel} c} = 5^{***}$  ( $L_{вз}$  — длина пространства взаимодействия),  $\mu_p = 3,5$ ,  $\zeta_0 = 2,5$ ,  $\mu_n = 5$ ,  $q = 5,4$ ,  $\frac{\beta_{\perp}}{\beta_{\parallel}} = 1$ ,  $\beta =$

\* Используются принятые в [4, 6, 7] обозначения параметров и исходные предположения о модели генератора.

\*\* В [5] условие циклотронного резонанса (1) выполнялось для встречной (по отношению к электронам) бегущей волны, являющейся компонентой поля паразитной моды. Результаты расчетов, проводимых в приближении фиксированной синусоидальной структуры поля, дают при резонансе со встречной волной погрешность в определении стартового тока моды, не превышающую 10% по сравнению с расчетами [3], учитывающими нефиксированность поля волны.

\*\*\* Значение  $\mu = 5$  соответствует случаю однородного распределения магнитостатического поля по длине резонатора в [5].

$$= \sqrt{\beta_{\perp}^2 + \beta_{\parallel}^2} = 0,3, \quad Q_p = 4 \cdot 10^3, \quad \hat{q} = 1, \quad \omega_p = 2\pi \cdot 33,73 \text{ ГГц}, \quad \omega_{п, кр} = 2\pi \cdot 14,6 \text{ ГГц}.$$

Конкуренция мод может возникнуть в тех случаях, когда определяемые линейной теорией [1] зоны самовозбуждения каждой из мод

$$\left( \Delta_p = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \left( \frac{\omega_p}{2\omega_H} - 1 \right) \in [0,22; 0,9], \quad \Delta_{п} = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \left( \frac{\omega_{п}}{\omega_H} - 1 \right) \in [-3,3; -2,2] \right)$$

соответствуют одной и той же области значений магнитостатического поля. В эксперименте [5] величина взаимной расстройки мод  $\tilde{\Delta} = \frac{2}{\beta_{\perp}^2} \frac{2\omega_{п} - \omega_p}{2\omega_H}$  была близка к  $\tilde{\Delta} \approx -3$ . Зависимости стартовых токов

обоих мод невозбужденного генератора от расстройки  $\Delta_p$  при  $\tilde{\Delta} = -3$  показаны на рис. 1 сплошными линиями, штрихпунктирные линии определяют при жестком самовозбуждении минимальный ток, при котором существуют колебания. При таком взаимном расположении зон самовозбуждения в процессе подачи напряжения на генератор первой может

возбудиться любая мода. Поэтому при расчете рассматривались обе возможности.

Полученные результаты позволили разделить область самовозбуждения обеих мод на плоскости параметров  $I, \Delta_p$  (рис. 1) на три качественно различные области I—III. В I независимо от очередности возбуждения мод устанавливаются колебания рабочей моды, в II всегда возбуждается паразитная мода, в III в зависимости от очередности самовозбуждения устанавливается одномодовая генерация первоначально возбужденной моды. Как показали расчеты, аналогичные описанным в [9], при подаче любым способом импульсного напряжения в гиротроне [5] первой возбуждается паразитная мода. Сопоставление рис. 1 с рис. 2 из

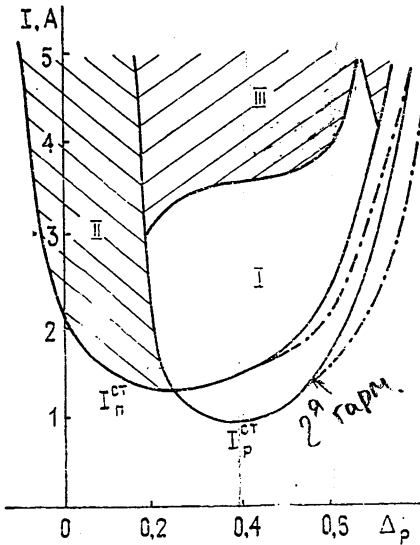


Рис. 1.

[5], где  $\delta_v = -\frac{\beta_{\perp}^2}{2} (\Delta_p - 0,38)$ , свидетельствует о том, что зона I на

рис. 2 [5] соответствует зоне I рис. 1, а зоны II, III рис. 1 соответствуют зоне генерации встречной волны, показанной в [5] на рис. 2, хотя и значительно уже ее вследствие предположения о фиксированности поля паразитной моды.

Зависимости факторов возбуждения обеих мод от текущей координаты позволяют определить целесообразность укорочения рабочего пространства для подавления паразитной моды. На рис. 2 приведены также зависимости для случаев первоначального возбуждения рабочей (а, б) и паразитной (в, г) мод. Из рис. 2 а, б видно, что при возбуждении рабочей моды эффекты «насыщения» начинают проявляться примерно одновременно для обеих мод, и преимущество рабочей моды обеспечивается лишь большими значениями  $\hat{\Phi}_p$  в линейном режиме

(ср. рис. 2 а, б с рис. 1 при указанных на рис. 2 значениях  $\tilde{\Delta}$ ). При этом нужно иметь в виду, что паразитная мода с нефиксированным продольным волновым числом возбуждается с частотой, соответствующей минимальному стартовому току; в такой ситуации рабочую моду нужно сравнивать с паразитной модой, имеющей расстройку  $\tilde{\Delta}$ , при которой фактор  $\hat{\Phi}(\tilde{\Delta})$  максимален.

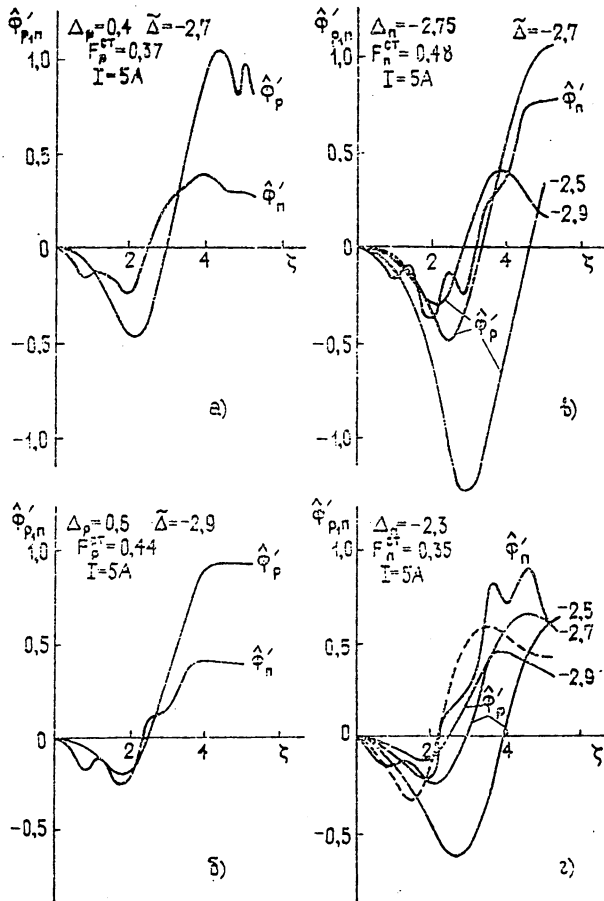


Рис. 2.

При первоначальном возбуждении паразитной моды, как следует из рис. 2 в, г, эффекты «насыщения» для нее проявляются раньше, чем для рабочей моды с малыми (по модулю) расстройками  $\tilde{\Delta}$ , и позже, чем для рабочей моды с большими расстройками  $\tilde{\Delta}$ , что можно объяснить кинематическими соображениями: эффективная группировка определяется углом пролета  $\Theta = \Delta\zeta$ , т. е. при больших расстройках она соответствует меньшим длинам. Из графиков, приведенных на рис. 2 в, следует, что при расстройке  $\Delta_n = -2,75$ , укоротив длину пространства взаимодействия путем уменьшения однородного участка магнитостатического поля с  $\mu = 5$  до  $\mu = 3,8 \div 3,9$ , можно расширить зону самовозбуждения рабочей моды в область больших (по модулю) расстройок  $\tilde{\Delta}$ . Следует, однако, иметь в виду, что уменьшение  $\mu$  за счет укорочения

длины резонатора повышает требования к спектру паразитных мод —

$$\text{условие (3) можно записать в виде } \left( \frac{\tilde{\omega}}{\omega_{\text{кр}}'} \right)_n \geq \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\pi}{8\beta_{\parallel} \mu_p} \frac{G_n}{G_p} \right]^2.$$

Расширение зоны генерации рабочей моды возможно также вследствие изменения ее продольной структуры. Если продольная структура рабочей моды имеет более близкий к катоду максимум  $f_p(\zeta) = \exp \left\{ - \left( \frac{\zeta - 1,75}{1,75} \right)^2 \right\}$ , то с укорочением длины пространства взаимодействия возможно возбуждение рабочей моды в более широкой области расстроек  $\tilde{\Delta}$  (соответствующая зависимость фактора  $\hat{\Phi}'_p(\zeta)$  показана на рис. 2 г штриховой линией для значения  $\tilde{\Delta} = -2,9$ ).

Обе меры — укорочение длины пространства взаимодействия и смещение максимума распределения поля рабочей моды в сторону катода — были использованы в [5] и привели к существенному расширению зоны устойчивой генерации рабочей моды. Таким образом, проведенный расчет согласуется с результатами эксперимента и их интерпретацией, данной в [5], а также проясняет ряд нелинейных свойств гиротрона, определяющих конкуренцию мод.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Петелин, В. К. Юлпатов, Изв. вузов—Радиофизика, 18, № 2, 290 (1975).
2. Н. И. Зайцев, Т. Б. Панкратова, М. И. Петелин, В. А. Флягин, Радиотехника и электроника, 19, № 5, 1056 (1974).
3. В. Л. Братман, М. А. Моисеев, Изв. вузов—Радиофизика, 18, № 7, 1045 (1975).
4. И. Г. Зарницына, Г. С. Нусинович, Изв. вузов — Радиофизика, 20, № 3, 461 (1977).
5. В. Е. Запезалов, Г. С. Кораблев, Ш. Е. Цимринг, Радиотехника и электроника, 22, № 8, 1661 (1977).
6. И. Г. Зарницына, Г. С. Нусинович, Изв. вузов — Радиофизика, 17, № 12, 1858 (1974).
7. М. А. Моисеев, Г. С. Нусинович, Изв. вузов — Радиофизика, 17, № 11, 1709 (1974).
8. В. Л. Братман, М. И. Петелин, Изв. вузов — Радиофизика, 18, № 10, 1538 (1975).
9. Г. С. Нусинович, Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, № 3, 44 (1974).

Институт прикладной физики  
АН СССР

Поступила в редакцию  
3 мая 1978 г.

#### EXCITATION OF PARASITIC MODES RESONANT WITH THE FIRST HARMONICS OF THE CYCLOTRON FREQUENCY IN A GYROTRON OPERATING AT THE MODE RESONANT WITH THE SECOND HARMONICS

*V. E. Zapevalov, I. G. Zarnitsyna, G. S. Nusinovich*

A competition is considered between the gyrotron operating mode resonant with the second harmonic of the cyclotron frequency and a parasitic mode excited with a relatively high longitudinal wave number in a resonance with the first harmonic. A separation is found between the critical frequency of the parasitic mode and the cyclotron frequency when the starting current of this mode is higher than the starting current of the operating one. Possibilities of broadening of the stability oscillation region of the operating mode are analysed if the parameter values being close to the experimental ones.