

УДК 621.385.69.01

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ПРОВИСАНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПУЧКА В ГИРОТРОНАХ

*В. Е. Запевалов, М. А. Моисеев*

Теоретически исследуется влияние провисания потенциала электронного пучка в мощных гиротронах со сверхразмерными открытыми резонаторами. Определены ограничения мощности и КПД гиротрона, обусловленные провисанием потенциала пучка в резонаторе. Рассмотрены изменения условий самовозбуждения, КПД и оптимальных параметров при ионной компенсации пространственного заряда электронного пучка в короткоимпульсном и длинноимпульсном режимах генерации.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Гиротроны ММ диапазона используются для ЭЦР нагрева и активной диагностики плазмы, а в последнее время и для технологических целей [1–3]. Для проектирования и оптимизации гиротронов необходима достоверная информация о параметрах активной среды — винтовых электронных пучков (ВЭП), а также факторах и процессах, на эти параметры влияющих. Одним из таких факторов является провисание потенциала ВЭП в резонаторе гиротрона, обусловленное собственным пространственным зарядом пучка. Особенно сильно влияние этого фактора в сверхмощных гиротронах при использовании интенсивных ВЭП и пространственно-развитых рабочих мод сверхразмерных открытых резонаторов. Теоретические исследования особенностей эффекта провисания потенциала для ВЭП выполнены в ряде работ [4–6]. Расчётные модели разной степени сложности показывают, что влияние провисания на параметры ВЭП выражено гораздо сильнее, чем в случае прямолинейных электронных пучков.

### 2. ОГРАНИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ

Легко показать, что провисание потенциала является существенным фактором, ограничивающим мощность и эффективность гиротронов с полыми резонаторами в виде слабонерегулярных отрезков цилиндрических волноводов.

Мощность гиротрона можно записать в виде [7]

$$P = IU t_{\perp} \eta_{\perp} \eta_c \frac{Q_{ohm}}{Q_{ohm} + Q_d}, \quad (1)$$

где  $I$  и  $U$  — ток и ускоряющее напряжение,  $\eta_{\perp}$  и  $\eta_c$  — поперечный КПД [8, 9] и коэффициент преобразования встроенного преобразователя,  $t_{\perp}$  — отношение осцилляторной энергии электронов к полной,  $Q_d$  и  $Q_{ohm}$  — дифракционная и омическая добротности. Скорость осцилляторного движения  $v_{\perp}$  определяется условиями формирования пучка в электронной пушке и с точностью до релятивистских поправок не зависит от провисания потенциала в резонаторе  $\Delta U$  [10]. Скорость поступательного движения

$$v_z = \sqrt{(2e/m_0)(U - \Delta U) - v_{\perp}^2} \quad (2)$$

уменьшается с увеличением  $\Delta U$  ( $e/m_0$  — отношение заряда к массе покоя электрона). При токах, больших предельного, провисание потенциала возрастает настолько, что приводит к неустойчивости электронного пучка ( $v_z \rightarrow 0$ ). Тогда, учитывая выражения для предельного тока, ограниченного провисанием [5, 6]

$$I_{\max} = 0,4U^{3/2}k/[(1 + g^2)^{3/2} \ln(R_c/R_b)], \quad (3)$$

и связь между питч-фактором  $g$  и  $t_{\perp}$  ( $t_{\perp} = g^2/(1 + g^2)$ ), получаем

$$P_{\max} = 0,4U^{5/2}\eta_c\eta_{\perp}k \frac{Q_{ohm}}{Q_{ohm} + Q_d} \frac{y(t_{\perp})}{\ln(R_c/R_b)}, \quad (4)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от скоростного разброса ( $k(0) = 1$ ) [5, 6, 10],  $y(t_{\perp}) = t_{\perp}(1 - t_{\perp})^{3/2}$ ,  $R_c$  и  $R_b$  — радиусы резонатора и электронного пучка. Легко видеть, что при прочих равных условиях  $y(t_{\perp})$  (см. рис. 1) определяет максимальную мощность гиротрона. Эта функция имеет единственный максимум при  $t_{\perp} = 0,4$  и обращается в нуль при  $t_{\perp}$ , равном 0 и 1, что имеет очевидный физический смысл. При типичных для современных гиротронов значениях  $t_{\perp} \approx 0,7$  величина  $y(t_{\perp})$  в 1,5–2 раза меньше максимальной (максимум КПД  $\eta = P/IU$  достигается при  $t_{\perp} \rightarrow 1$ , когда  $y(t_{\perp}) \rightarrow 0$ , так что приходится искать компромиссное решение между  $\eta_{\max}$  и  $P_{\max}$ ). Тем не менее, работа гиротрона при максимальной величине  $y(t_{\perp})$  в некоторых случаях может иметь смысл, особенно при использовании рекуперации [11, 12].

Зависимости максимальной достижимой мощности гиротрона от ускоряющего напряжения при различных величинах отношения  $R_b/R_c$  на рис. 2 приведены для типичных величин  $Q_{ohm}/(Q_{ohm} + Q_d) = 0,95$ ,  $t_{\perp} = 0,75$ ,  $\eta_{\perp} = 0,6$ ,  $\eta_c = 0,83$  и  $k = 1$  (нулевой разброс). Отметим, что при типичных значениях питч-фактора и скоростного разброса величина  $k$  составляет 0,5–0,7 [5, 6] и величина максимальной выходной мощности снижается в 1,5–2 раза. Использование в современных гиротронах для снижения омических потерь пространственно развитых мод ( $R_b/R_c \sim 0,5$ ) [2, 3] вместо используемых ранее мод шепчущей галереи

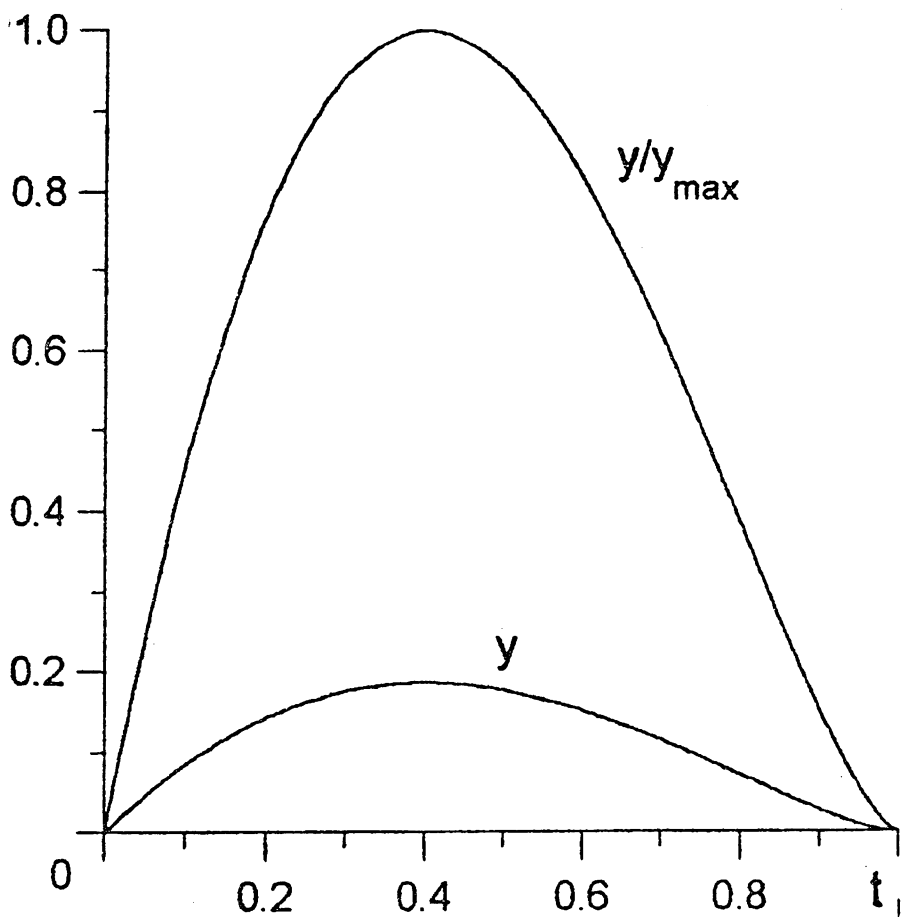


Рис. 1. Зависимость безразмерной мощности гиротрона от отношения осцилляционной энергии электронов к полной.

( $R_b/R_c \sim 1$ ) [1] требует, согласно рис. 2, для достижения уровня мощности 1 МВт ускоряющих напряжений 80 кВ и более.

### 3. УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

Вторым, довольно очевидным эффектом является снижение стартового тока при самовозбуждении колебаний в гиротроне и смещение зоны самовозбуждения в сторону меньших магнитных полей, что обусловлено снижением эффективного потенциала и увеличением времени пролёта.

В модели гиротрона с гауссовой продольной структурой ВЧ поля в резонаторе  $f(z) = \exp[-(2z/L)^2]$  стартовый ток определяется выражениями [8]

$$I_{st} \frac{1,46Q\beta_{\perp}^{2n}L^2G}{10^3\beta_z^3\lambda^2} \left( -\frac{n}{\mu} - \frac{d}{d\theta} \right) \exp\left(-\frac{\theta^2}{8}\right) = 1. \quad (5)$$

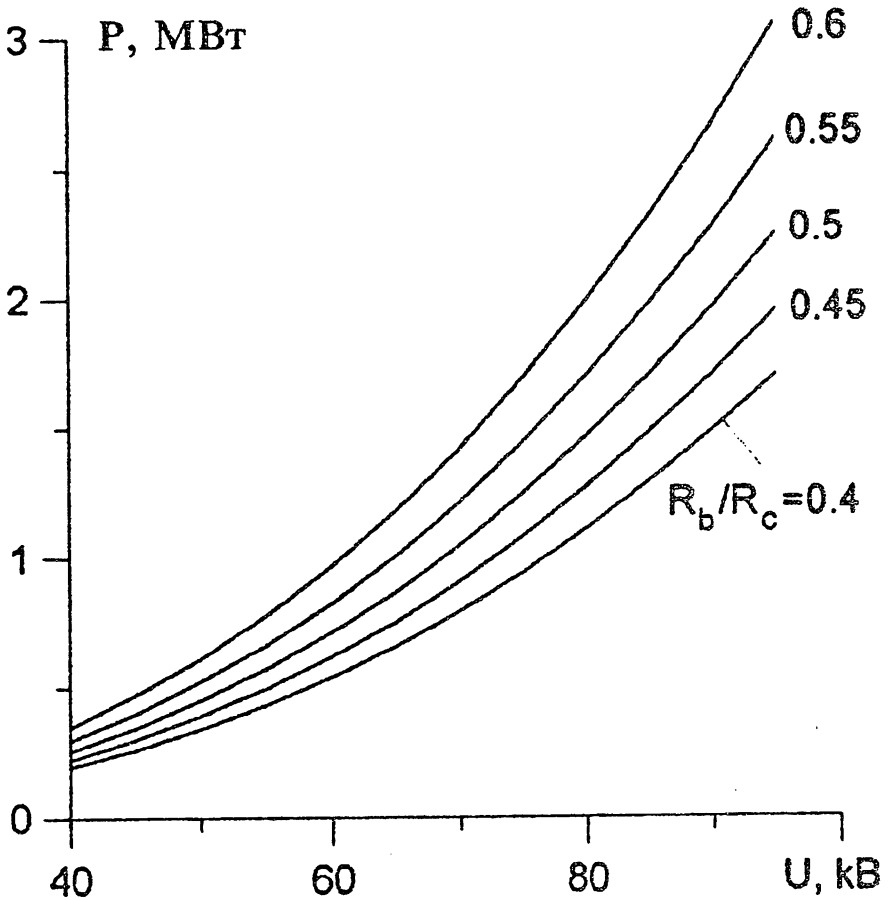


Рис. 2. Зависимость мощности гиротрона от ускоряющего напряжения.

Здесь  $Q$  — добротность резонатора,  $\beta_{\perp} = v_{\perp}/c$ ,  $\beta_z = v_z/c$ ,  $c$  — скорость света,  $L$  — эффективная длина резонатора,  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве,  $\mu = \pi\beta_{\perp}^2 L/(\beta_z \lambda)$ ,  $n = 1, 2$  — номер рабочей гармоники циклотронной частоты ( $\omega \approx n\omega_H$ ),  $\theta = (2\pi L/\beta_z \lambda)(1 - n\omega_H/\omega)$  — угол пролёта через резонатор,  $G$  — структурный фактор, определяющий связь электронного пучка с ВЧ полем [7–9]. Минимум стартового тока достигается при  $\theta = 2\sqrt{1 + n^2/\mu^2} + 2n/\mu$ . В гиротронах, как правило, параметр  $\mu \gg n$ . Тогда из (2), (5) следует:

$$I_{st}^{\min} = \frac{2,26 \cdot 10^3 \lambda^2}{QL^2 G \beta_{\perp}^{2n}} \left( \frac{2e}{m_0 c^2} (U - \Delta U) - \beta_{\perp}^2 \right)^{3/2}, \quad (6)$$

оптимальная величина статического магнитного поля равна

$$B = \left( 1 - \frac{\beta_z \lambda}{\pi L} \right) \frac{\omega m_0}{\pi e} \left( 1 + \frac{e}{m_0 c^2} (U - \Delta U) \right). \quad (7)$$

Первый множитель в (7) близок к единице и почти не изменяется. Зависимость  $B$  от  $\Delta U$  определяется, главным образом, последним множителем.

В реальных гиротронах со сглаженным профилем продольного сечения структура ВЧ поля в резонаторе [1–3, 7] близка к гауссовской и зоны самовозбуждения качественно соответствуют выражениям (5)–(7). Для примера на рис. 3 приведены расчётные зоны самовозбуждения самосогласованной модели гиротрона (с нефиксированной структурой ВЧ поля [9] и разбросом скоростей электронов [7, 10]) при наличии и отсутствии провисания потенциала. Осцилляции зависимости  $I_{st}(B)$  получаются вследствие нефиксированности реальной структуры ВЧ поля.

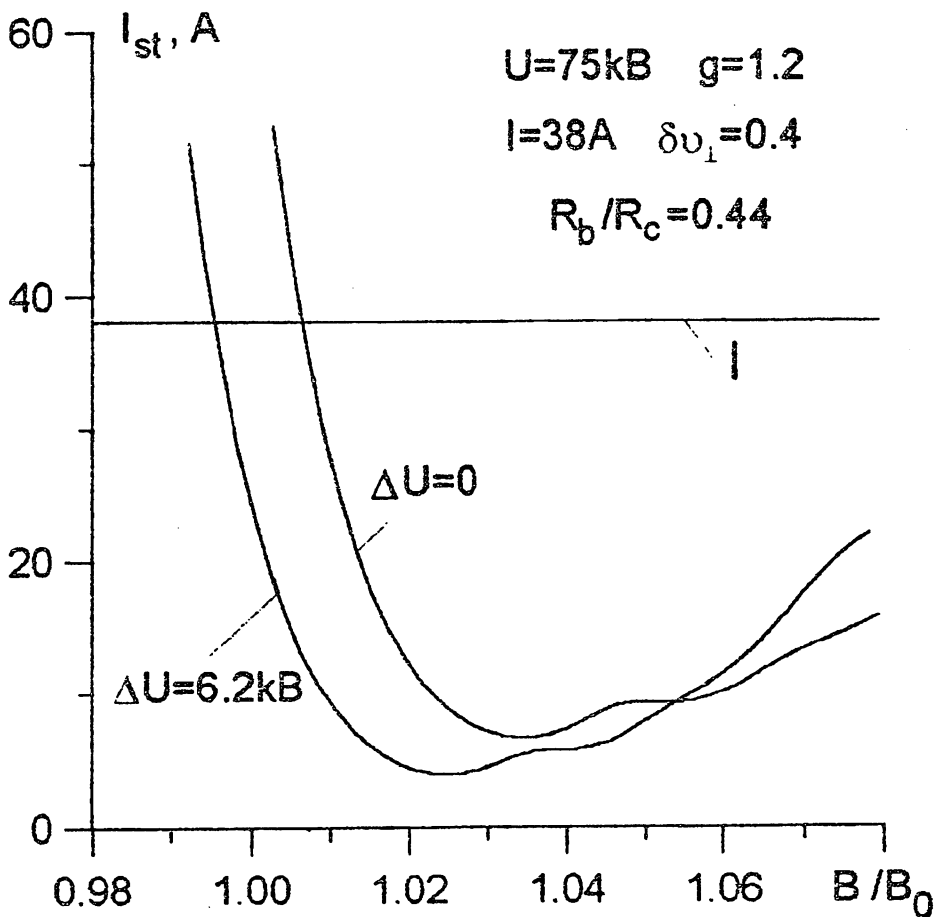


Рис. 3. Зависимость стартового тока  $I_{st}$  от величины статического магнитного поля в резонаторе  $B$ .

#### 4. ИЗМЕНЕНИЕ ЗОНЫ ГЕНЕРАЦИИ

Третьим эффектом является смещение настроечных кривых (зависи-

мостей КПД и выходной мощности от магнитного поля) в сторону меньших магнитных полей, что также обусловлено снижением эффективного потенциала и увеличением времени пролёта. Оптимальные значения угла пролёта, таким образом, при наличии провисания соответствуют меньшим магнитным полям и достижимые значения КПД могут несколько измениться. На рис. 4 приведены расчётные настроечные кривые для типичного гиротрона при наличии и отсутствии провисания.

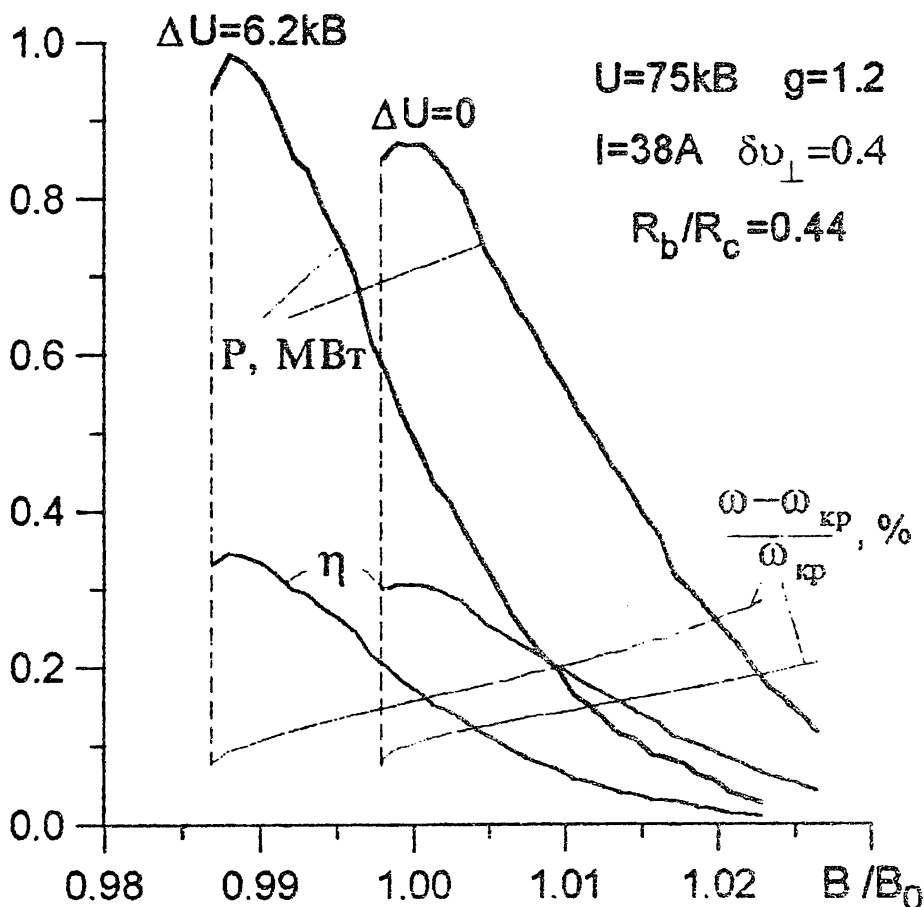


Рис. 4. Зависимости КПД, выходной мощности и расстройки рабочей и критической частот  $\omega - \omega_{кр}$  от величины магнитного поля в резонаторе  $B$ .

Отметим, что в длинноимпульсных и непрерывных гиротронах за время порядка 100 мс происходит практически полная компенсация пространственного заряда пучка положительными ионами, и это соответствует отсутствию провисания [13]. Таким образом, оптимальное магнитное поле настроечных кривых при наличии провисания  $B_1$  соответствует

короткоимпульсному режиму ( $T_{\text{и}} \ll 100$  мс), а при отсутствии провисания  $B_0$  — непрерывному режиму ( $T_{\text{и}} \gg 100$  мс). Значения магнитного поля, меньшие  $B_0$ , приводят к ограничению длительности импульса. При длительностях  $T_{\text{и}} \sim 100$  мс постоянное магнитное поле не может быть установлено на оптимальное значение и в этих режимах достижимый КПД обычно меньше, чем в короткоимпульсном или длинноимпульсном, что соответствует хорошо известным эмпирическим фактам. Отметим, что в процессе ионной компенсации происходит не только изменение выходной мощности, но и снижение частоты генерации (электронная перестройка, также показанная на рис. 4).

Очевидно, что эффекты провисания и ионной компенсации могут существенно повлиять на процессы межмодового взаимодействия, которые зависят от параметров электронного пучка, расстройки магнитного поля и сценария включения, и это требует их корректного учёта при численном моделировании процессов взаимодействия мод.

Аналогичные расчёты, проведённые для случая коаксиальных резонаторов, показали, что в них эффект провисания существенно ослаблен.

В свете вышеизложенного видно, что назрела необходимость разработки методики экспериментального определения влияния провисания на параметры ВЭП, проведения экспериментов и их сопоставления с расчётными данными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Andronov A. A., Flyagin V. A., Gaponov A. V. et al. // *Infrared Physics*, 1978. V. 18. № 6. P. 385.
2. Flyagin V. A., Goldenberg A. L., Zapevalov V. E. // *Conf. Digest, 18 Int. Conf. on IR and MM Waves, 6–10 September, University of Essex Colchester, United Kingdom, 1993. P. 581.*
3. Denisov G. G., Flyagin V. A., Zapevalov V. E. // *Conf. Proc., 20 Int. Conf. on IR and MM Waves, Orlando, USA, 1995. P. 197.*
4. Drobot A. T., Kim K. // *Int. J. Electronics*, 1981. V. 51. P. 351.
5. Цимринг Ш. Е. // *Радиотехника и электроника*, 1990. Т. 35. № 6. С. 1284.
6. Tsimring Sh. E. // *Int. J. of IR and MM Waves*, 1993. V. 14. № 4. P. 817.
7. Запезалов В. Е. и др. // *Электронная промышленность*, 1991. № 6. С. 71.
8. Нусинович Г. С., Эрм Р. Э. // *Электронная техника, сер. 1, Электроника СВЧ*, 1972. № 8. С. 55.
9. Кураев А. А. *Теория и оптимизация электронных приборов СВЧ*. — Минск: Наука и техника, 1979. — 336 с.
10. Lygin V. K. // *Int. J. of IR and MM Waves*, 1995. V. 16. № 2. P. 363.

11. Fix A. Sh. et al. //Int. J. Electronics, 1984. V. 57. № 6. P. 821.
12. Бородачёва Т. В., Гольденберг А. Л., Мануилов В. И. //Гиротроны. — Горький: ИПФ АН СССР, 1989. С. 161.
13. Варенцов В. А., Цимринг Ш. Е. //ЖТФ, 1983. Т. 53. № 2. С. 264.

Институт прикладной физики  
РАН,  
Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию  
21 ноября 1996 г.