

УДК 621.385.6

## СТАРТОВЫЕ УСЛОВИЯ МЦР-МОНОТРОНА ПРИ НАЛИЧИИ РАЗБРОСА СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

*И. И. Антаков, В. С. Ергаков, Е. В. Засыпкин, Е. В. Соколов*

Приведены расчет и экспериментальное исследование влияния разброса скоростей электронов на стартовые условия МЦР-монотрона при различных параметрах электронного пучка и резонатора. Расчетные данные и результаты измерений находятся в удовлетворительном соответствии.

В мощных электронных пучках мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) [1] разброс скоростей электронов практически неизбежен. Наличие разброса снижает эффективность взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем и приводит к изменению характеристик прибора [2, 3]. В настоящей работе изложены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния разброса скоростей на стартовые условия МЦР-монотрона с аксиально-симметричной электродинамической системой и трубчатым электронным пучком. Расчеты основаны на линейной теории МЦР-монотрона со слабо релятивистским электронным пучком, взаимодействующим на частоте циклотронного резонанса с одной из высокодобротных ТЕ-мод резонатора.

### 1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Условие самовозбуждения МЦР-монотрона, определяющее стартовый ток, записывается в виде [4]

$$1 - 4\pi Q \chi'' = 0, \quad (1)$$

где  $Q$  — добротность резонатора,  $\chi''$  — мнимая часть электронной восприимчивости  $\chi = \chi' + i\chi''$ .

При наличии разброса скоростей, невозмущенных высокочастотным полем вращательного и поступательного движения электронов, и, в общем случае, разброса координат ведущих центров электронных орбит восприимчивость равна

$$\chi = \int \chi_0 f(v_{\perp}, v_{\parallel}, r) dv_{\perp} dv_{\parallel} dr. \quad (2)$$

Здесь  $f(v_{\perp}, v_{\parallel}, r)$  — стационарная, нормированная на единицу, функция распределения электронов по скоростям и координатам ведущих центров на входе в пространство взаимодействия,

$$\chi_0 = \frac{i\hat{l}}{2\pi Q\mu^4} \left(1 + \mu \frac{d}{d\theta}\right) \left[ \int_0^{\mu} F(\zeta) e^{-\theta\zeta/\mu} \int_0^{\zeta} F(\zeta') \exp(i\theta\zeta'/\mu) d\zeta' d\zeta \right] \quad (3)$$

— восприимчивость односкоростной группы электронов, имеющих общую ось вращения. В (3)  $\mu = \pi(\beta_{\perp}^2/\beta_{\parallel}) (L/\lambda)$ ,  $L$  — длина резонатора,

$\lambda = 2\pi c/\omega$ ,  $\beta_{\perp} = v_{\perp}/c$ ,  $\beta_{\parallel} = v_{\parallel}/c$  — отношение скоростей вращательного и поступательного движения к скорости света  $c$ ,  $\theta = (\omega - \omega_H) \Delta/v_{\parallel}^2$ ,  $F(\zeta)$  — функция распределения ВЧ поля по продольной координате, отсчитываемой от входного сечения резонатора,  $\zeta = \pi(\beta_{\perp}^2/\beta_{\parallel}) (z/\lambda)$ ,  $\omega_H$  —

циклотронная частота электронов,  $\hat{J}$  — безразмерный параметр, пропорциональный току пучка, добротности резонатора и геометрическому фактору, определяемому местом встрела электронов и рабочим типом колебаний резонатора.

Винтовые электронные пучки, формируемые адиабатическими магнетронно-инжекторными пушками, обычно используемыми в МЦР, имеют незначительный радиальный разброс ведущих центров электронных траекторий и равномерное распределение их по азимутальной координате [5]. Кроме того, в стартовом режиме (при малых точках пучка) можно пренебречь влиянием пространственного заряда и считать, что невозмущенные высокочастотным полем электроны пучка имеют одинаковую энергию. В этом случае условие (1) для  $TE_{mq}$ -типа колебаний с синусоидальным продольным распределением ВЧ поля в цилиндрическом резонаторе преобразуется к виду

$$I_{st}(a) = \frac{\pi \bar{\beta}_{\parallel}^2 \alpha}{0,24 \beta^2 Q(L/\lambda)} \left( \frac{\bar{\beta}_{\parallel}}{\beta} \right)^2 \frac{[(xR_p)^2 - m^2] J_m^2(xR_p)}{J_{m-1}^2(xR_e)} V(\kappa B); \quad (4a)$$

$$\alpha^{-1} = \left( \frac{\bar{\beta}_{\parallel}}{\beta} \right)^{-1} \int_0^1 (1-\gamma^2)^{-1/2} \left( 1 + \nu_0 \frac{\gamma^2}{\gamma_0^2} \frac{d}{d\theta_0} \right) \tilde{\chi} f(\gamma) d\gamma; \quad (4б)$$

$$\tilde{\chi} = - \frac{\pi^2 q^2}{2} \frac{1 + (-1)^{q+1} \cos \theta}{[(\pi q)^2 - \theta^2]^2}; \quad (4в)$$

$$\frac{\bar{\beta}_{\parallel}}{\beta} = \int_0^1 (1-\gamma^2)^{1/2} f(\gamma) d\gamma, \quad (4г)$$

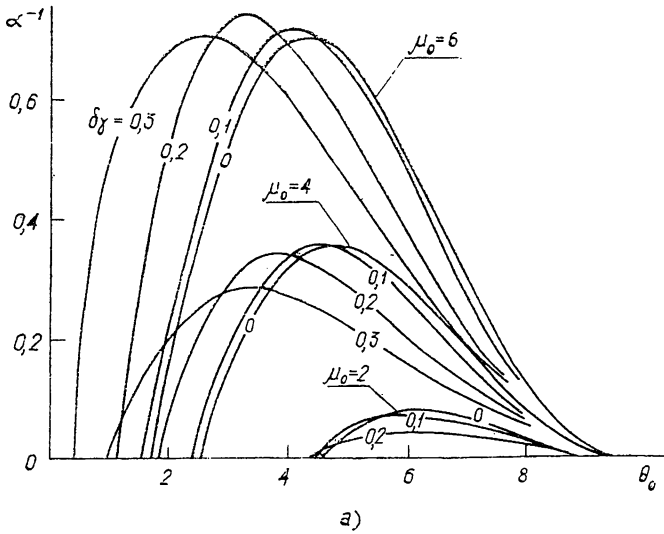
где  $I_{st}$  — стартовый ток в амперах,  $V$  — ускоряющее напряжение в киловольтах,  $R_e$  и  $R_p$  — радиусы пучка и резонатора,  $\gamma = v_{\perp}/v$ ,  $v$  — полная скорость электронов,  $\kappa$  — поперечное волновое число,  $m$  и  $q$  — азимутальный и продольный индексы рабочего типа колебаний,  $J_m$  — функция Бесселя первого рода. Индексом «0» здесь и в дальнейшем обозначены величины, определяемые при параметрах электронного пучка, соответствующих максимуму функции  $f(\gamma)$ .

Функция распределения электронов по скоростям в рабочих режимах МЦР близка к симметричной [6]. Симметрия нарушается лишь электронами с относительно большими продольными скоростями, не влияющими существенно на взаимодействие пучка с ВЧ полем резонатора. Поэтому при вычислении стартового тока распределение электронов по скоростям может быть аппроксимировано с достаточной степенью точности двухпараметрической функцией, в частности функцией вида

$$f(\gamma) = \begin{cases} a(\gamma - \gamma_0 + 0,5 \delta\gamma) & (\gamma_0 - 0,5 \delta\gamma \leq \gamma \leq \gamma_0) \\ a(-\gamma + \gamma_0 + 0,5 \delta\gamma) & (\gamma_0 \leq \gamma \leq \gamma_0 + 0,5 \delta\gamma) \end{cases}. \quad (5)$$

Здесь  $a$  — нормировочный множитель,  $\delta\gamma = \delta v_{\perp} g_0 (1 + g_0^2)^{-1/2}$ ,  $\delta v_{\perp}$  — относительный разброс поперечных скоростей электронов,  $g_0$  — отношение поперечной и продольной скоростей электронов в максимуме функции распределения.

На рис. 1—3 приведены результаты расчетов параметра  $\alpha$ , определяющего стартовый ток (4 а) резонатора с пучком, распределение электронов по скоростям в котором описывается функцией (5), при различных значениях параметров системы  $\delta v_{\perp}$ ,  $q$ ,  $\mu_0$  и  $g_0$ .



Разброс скоростей электронов вызывает расширение зоны отрицательного поглощения ( $\chi'' > 0$ ) в полосе циклотронного резонанса и смещение минимального значения стартового параметра  $\alpha_{\min}$  в сторону меньших по абсолютной величине углов пролета электронов  $\theta$  (рис. 1). Смещение зоны  $\chi'' > 0$  обусловлено влиянием электронов с относительно малыми продольными скоростями ( $\beta_{\parallel} < \beta_{\parallel}^{(0)}$ ), наиболее эффективно взаимодействующих с ВЧ полем резонатора. Если разброс скоростей электронов невелик, так что углы пролета всех электронов пучка не выходят за пределы зоны отрицательного поглощения, то с возрастанием разброса скоростей величина  $\alpha_{\min}$  уменьшается (рис. 1 а, 2), соответственно уменьшается и стартовый ток. Большой разброс скоростей приводит к увеличению  $\alpha_{\min}$  и стартового тока, так как углы пролета части медленных электронов оказы-

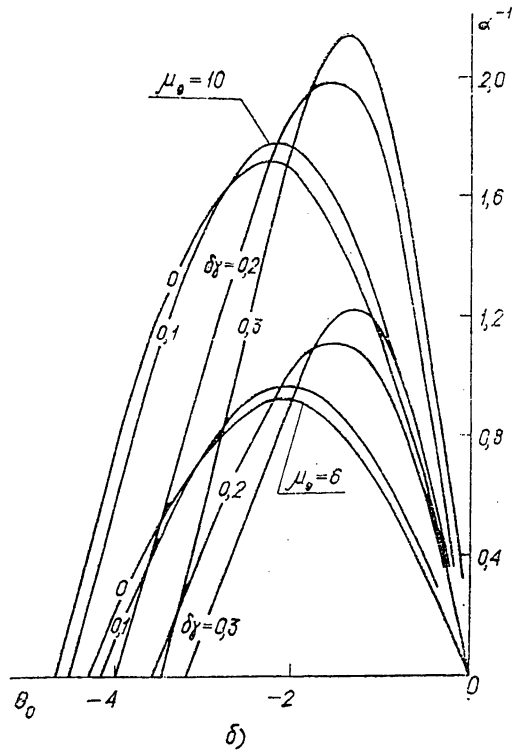


Рис. 1. Зоны отрицательного поглощения электронного потока при  $g_0=2$ ; а)  $q=1$ , б)  $q=2$ .

ваются в зоне поглощения. При увеличении  $g_0$ ,  $q$  и уменьшении  $\mu_0$  относительная ширина зоны отрицательного поглощения сужается и влияние разброса скоростей возрастает (рис. 2, 3).

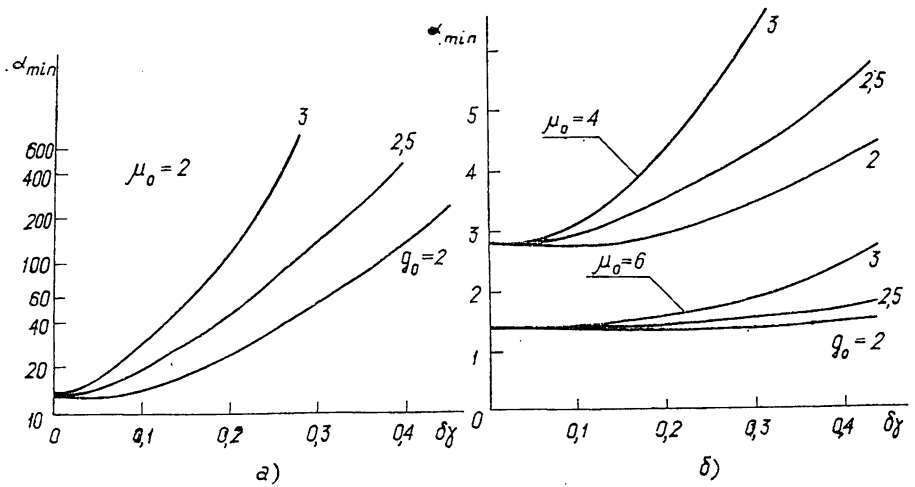


Рис. 2. Зависимость стартового параметра  $\alpha_{min}$  от разброса скоростей электронов при  $q = 1$ .

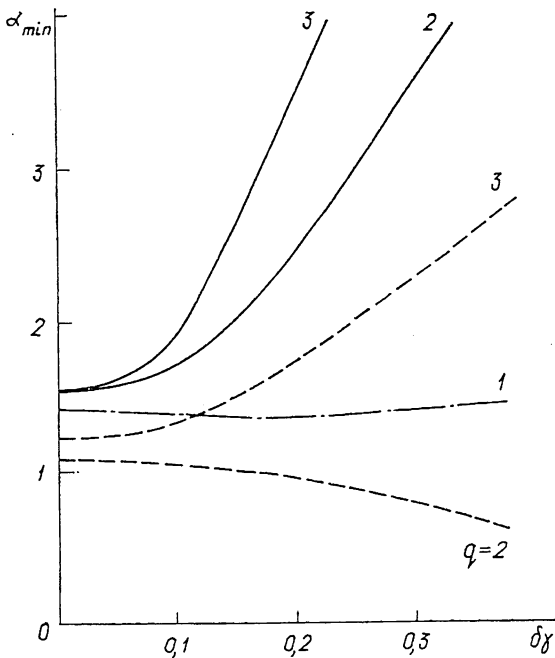


Рис. 3. Зависимость  $\alpha_{min}$  от величины разброса скоростей электронов. Сплошные и штриховые кривые соответствуют областям резонансного взаимодействия с электронным потоком попутных и встречных волн ( $g_0 = 2$ ,  $\mu_0 = 6$ ).

Аномальное поведение зависимости  $\alpha_{\min}$  в случае резонатора с двумя продольными вариациями поля ( $q=2$ ) от величины относительного разброса скоростей в области, соответствующей резонансному взаимодействию пучка со встречной волной ( $\theta_0 \leq 0$ ), обусловлено тем, что медленные электроны при увеличении разброса скоростей не выходят из зоны отрицательного поглощения, ограниченной значением  $\theta_0 = 0$ , и не попадают в зону  $\chi'' < 0$ .

Для оценки пределов изменения параметров электронного пучка и резонатора, в которых влияние разброса скоростей не существенно, приведем соотношение, полученное в предположении, что разброс углов пролета электронов, связанный с разбросом их скоростей, не превышает полуширины зоны  $\chi'' \geq 0$ ,

$$\delta v_{\text{гр}} = \frac{1}{2g_0^2} \frac{\theta_{\min}^{(0)} [\theta_2^{(0)} - \theta_1^{(0)}]}{\theta_1^{(0)} \theta_2^{(0)}}. \quad (6)$$

Здесь  $\delta v_{\text{гр}}$  — граничное значение разброса поперечных скоростей,  $\theta_1^{(0)}$  и  $\theta_2^{(0)}$  — граничные значения углов пролета области  $\chi'' \geq 0$  при  $\delta v_{\perp} = 0$ ,  $\theta_{\min}^{(0)}$  — угол пролета электронов, соответствующий  $\alpha_{\min}$  при  $\delta v_{\perp} = 0$ . Для резонаторов с одной продольной вариацией поля ( $q=1$ ) значения углов пролета, входящих в (6), в интервале изменения  $\mu_0$  от 2 до 10 определяются приближенными выражениями:  $\theta_1^{(0)} \approx 3\pi\mu_0^{-1}$ ,  $\theta_2^{(0)} \approx 3\pi$  и  $\theta_{\min}^{(0)} \approx 3\pi\mu_0^{-1/2}$ . В этом случае соотношение (6) преобразуется к виду

$$\delta v_{\text{гр}} = \frac{1}{2g_0^2} \frac{\mu_0 - 1}{\sqrt{\mu_0}}.$$

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальный МЦР-монотрон, который использовался при измерениях стартового тока, конструктивно аналогичен описанному в [7]. Резонатором в нем является отрезок цилиндрического волновода, ограниченный диафрагмой вывода энергии и запредельным для рабочего типа колебаний сужением. В таком резонаторе длина области локализации высокочастотного поля несколько превышает длину его цилиндрического участка. Правильное же определение длины пространства взаимодействия весьма существенно при расчете стартовых токов, поскольку  $I_{\text{ст}} \sim (\lambda/L)^2$ . Как показали измерения, продольное распределение ВЧ поля в резонаторах, использованных в эксперименте, близко к распределению поля в закрытом с торцов резонаторе, собственная частота и радиус которого совпадают с частотой и радиусом исследуемого резонатора. Такая аппроксимация реального распределения поля обеспечивает необходимую точность при сопоставлении экспериментальных и теоретических значений стартового тока.

Параметры исследуемых МЦР-монотронов удовлетворяют условию мягкого режима возбуждения колебаний, что позволило определять стартовые токи по графикам экспериментальных зависимостей мощности выходного излучения от тока электронного пучка. Этот способ определения стартовых токов позволяет также контролировать в ходе эксперимента частоту и тип возбуждающихся колебаний.

Экспериментально находились зависимости стартового тока от величин магнитостатического поля в пространстве взаимодействия  $H_0$  и отношения магнитных полей в резонаторе и на катоде электронной пушки  $H_0/H_K$  (рис. 4, 5). Параметры  $\delta v_{\perp}$  и  $g_0$ , характеризующие функ-

цию распределения скоростей электронов, зависят от тока электронного пучка и величины  $H_0/H_K$ . Поэтому необходимые для расчета стартовых токов значения этих параметров определялись в режимах, соответствующих стартовым режимам, с помощью электронно-оптических измерений методом, описанным в [6]. Полученные величины  $\delta v_{\perp}$  и  $g_0$  приведены также на рис. 4, 5.

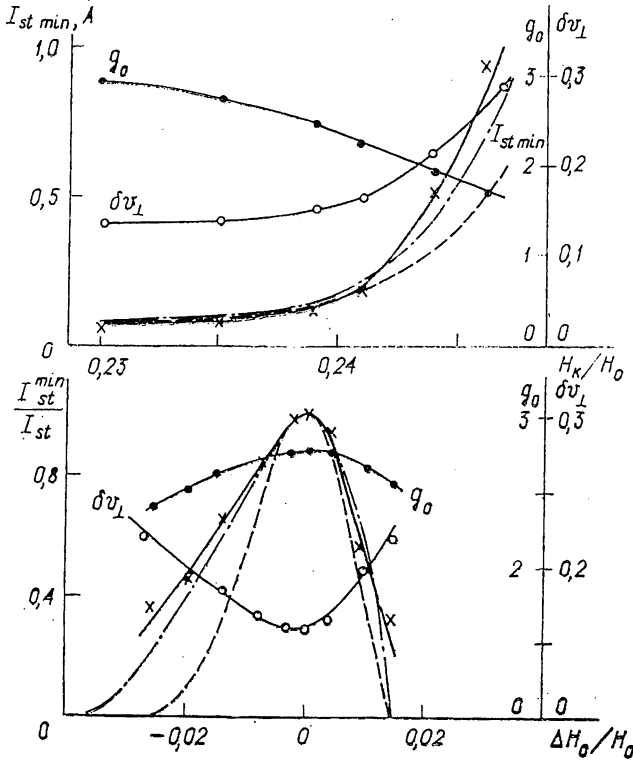


Рис. 4, 5.

Рис. 4. Зависимость минимального стартового тока резонатора ( $Q=1000$ ,  $L=2,5\lambda$ ) и параметров  $g_0$  и  $\delta v_{\perp}$  от величины отношения магнитных полей на катоде и в резонаторе.

Сплошная кривая — эксперимент, штриховая — расчет без учета разброса скоростей электронов, штрих-пунктирная — расчет с учетом разброса электронов по скоростям.

Рис. 5. Зависимость стартового тока резонатора ( $Q=700$ ,  $L=2\lambda$ ) и параметров  $g_0$  и  $\delta v_{\perp}$  от величины магнитного поля в пространстве взаимодействия.

Сплошная кривая — экспериментальные кривые, штрих-пунктирная и штриховая — расчетные кривые с учетом и без учета разброса электронов по скоростям.

В области малых  $H_K/H_0$  (большие значения  $g_0$ ) и малых стартовых токов разброс скоростей электронов невелик и измеренные значения  $I_{st\ min}$  совпадают с рассчитанными по соотношениям моноскоростной теории. С увеличением  $H_K/H_0$  и уменьшением  $g_0$ , при больших токах электронного пучка, возрастает величина разброса скоростей электронов и его влияние на стартовый ток становится существенным. Учет разброса скоростей электронов позволяет получить хорошее совпадение расчетных значений  $I_{st\ min}$  с измеренными. Небольшое их различие обусловлено неточностью аппроксимации реальной функции распределения электронов по скоростям.

Приведенные на рис. 5 графики зависимости  $I_{st}^{min}/I_{st}$  от расстройки магнитного поля в резонаторе характеризуют изменение  $I_{st}$  в полосе циклотронного резонанса. Величина расстройки магнитного поля  $\Delta H_0$  связана с изменением угла пролета  $\Delta\theta$  следующим соотношением:

$$\frac{\Delta H_0}{H_0} = - \frac{\beta_{\parallel}^{(0)} \Delta\theta (\lambda/L)}{2\pi - \theta_{min} \beta_{\parallel}^{(0)} (\lambda/L)},$$

где  $H_0$  и  $\theta_{min}$  — магнитное поле и угол пролета, при которых  $I_{st} = I_{st}^{min}$ . Расчетная зависимость с учетом разброса скоростей электронов и в этом случае, как видно из рисунка, достаточно хорошо совпадает с измеренной.

Приведенные результаты позволяют, таким образом, оценить влияние разброса электронов по скоростям на стартовые условия МЦР-модотрона при различных параметрах электронного пучка и резонатора. Основными эффектами, связанными с наличием разброса, являются увеличение стартового тока и расширение полосы возбуждения резонатора. Учет этих эффектов необходим при расчете и конструировании мощных МЦР и, в особенности, МЦР, в которых возможно возбуждение конкурирующих (паразитных) видов колебаний [8].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 10, № 9—10, 1414 (1967).
2. В. П. Тараненко, В. Н. Глущенко, С. В. Кошечая, К. Я. Лиждвой, В. А. Прус, В. А. Трапезон, Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, вып. 12, 47 (1974).
3. Е. М. Демидович, И. С. Ковалев, А. А. Кураев, Ф. Г. Шевченко, Радиотехника и электроника, 18, № 10, 2097 (1973).
4. М. И. Петелин, В. К. Юлпатов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 18, № 2, 290 (1975).
5. А. Л. Гольденберг, М. И. Петелин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 16, № 1, 141 (1973).
6. И. И. Антаков, В. А. Гинцбург, Е. В. Засыпкин, Е. В. Соколов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 18, № 8, 1196 (1975).
7. А. В. Гапонов, А. Л. Гольденберг, Д. П. Григорьев, Т. Б. Панкратова, М. И. Петелин, В. А. Флягин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 18, № 2, 280 (1975).
8. М. А. Моисеев, Г. С. Нусинович, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 17, № 11, 1709 (1974).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию  
21 ноября 1975 г.