

ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ НА ФАЗОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В МИКРОТРОНЕ

К. А. Беловинцев, А. В. Серов

УДК 621.384.633.8

Рассмотрено фазовое движение частиц в микротроне, в резонаторе которого кроме основного типа колебаний E_{010} возбуждены "паразитные" колебания типа E_{011} . Движение исследовалось в линейном приближении для бесконечно тонкого ускоряющего промежутка. Показано, что ширина и положение области фазовой устойчивости зависят от отношения амплитуд колебаний типа E_{011} и E_{010} .

Анализ экспериментальных результатов, описанных в работе /1/, показал наличие зависимости коэффициента захвата электронов в микротроне от величины тока эмиссии. В настоящей работе для качественного объяснения полученной зависимости привлекается механизм влияния высших гармоник ускоряющего поля, наводимых в резонаторе током ускоряемого пучка, на фазовое движение электронов в микротроне.

Как известно /2/, собственные частоты колебаний типа E_{01p} в цилиндрическом резонаторе с радиусом r и толщиной l определяются выражением

$$\omega_{01p} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{2,405}{r}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{l}\right)^2}, \quad (1)$$

где ϵ , μ — диэлектрическая и магнитная проницаемость среды, а p — целое число.

При $r/l \approx 1,32$ или $r/l \approx 2,15$ собственная частота колебаний типа E_{011} в резонаторе может совпадать соответственно со второй или третьей гармоникой тока пучка. Учитывая характерную для микротронов высокую степень группировки ускоренного пучка, предположение о наличии в нем высших гармоник тока с достаточно

высокими значениями амплитуд представляется вполне правдоподобным. Для используемых в настоящее время в микротронах параметров цилиндрических резонаторов наиболее вероятным является возбуждение в них колебаний типа E_{011} третьей гармоникой тока пучка.

Выполненные в ФИАНе измерения добротности цилиндрического резонатора микротрона с колебаниями типа E_{011} показали, что величина добротности достигает значения $Q_3 = 800 \pm 1000$. При таких величинах добротности в микротроне с числом орбит ~ 15 и током ~ 40 мА амплитуда колебаний E_{011} может составить $10 \pm 15\%$ от амплитуды колебаний основного типа E_{010} .

Результаты этих оценок стимулировали рассмотрение фазовых колебаний частиц в микротроне с учетом влияния высших гармоник ускоряющего напряжения, в частности, третьей гармоники. Уравнения, описывающие в этом случае изменение фазы и энергии за один оборот частиц в микротроне с бесконечно тонким ускоряющим промежутком, отличаются от обычных фазово-энергетических уравнений /3/ только членом, учитывающим влияние колебаний типа E_{011} на энергию частиц

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n + 2\pi\Gamma_n/\Omega \quad (2)$$

$$\Gamma_{n+1} = \Gamma_n + A \cos \varphi_{n+1} - A_3 \cos (3\varphi_{n+1} + \psi),$$

где φ_n - фаза, в которой частица проходит ускоряющий промежуток на n -том обороте; Γ_n - энергия частицы после прохождения промежутка (в единицах $m_0 c^2$); A , A_3 - амплитуды напряжения колебаний E_{010} и E_{011} соответственно (в единицах $m_0 c^2/e$); $\Omega = H/H_0$; H - амплитуда ведущего магнитного поля; $H_0 = 2\pi m_0 c^2/e\lambda$; λ - длина волны СВЧ поля; e , m_0 - заряд и масса покоя частицы; c - скорость света; ψ - фазовый сдвиг между колебаниями E_{010} и E_{011} .

Следуя методике, развитой в работе /3/, будем рассматривать фазовое движение в линейном приближении. Считая отклонение фазы и энергии частиц от равновесных значений малыми, линеаризуем систему уравнений (2) и запишем ее в матричном виде

$$\begin{pmatrix} \eta_{n+1} \\ \gamma_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -2\pi\alpha & 1 - 2\pi\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \eta_n \\ \gamma_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

где

$$\eta_n = \varphi_n - \varphi_{s,n}; \quad \gamma_n = \frac{2\pi}{\Omega} (\Gamma_n - \Gamma_{s,n});$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi_S - 3k \sin (3\varphi_S + \psi)}{\cos \varphi_S - k \cos (3\varphi_S + \psi)}; \quad k = \frac{A_3}{A}$$

Γ_S ; φ_S — равновесные значения энергии и фазы.

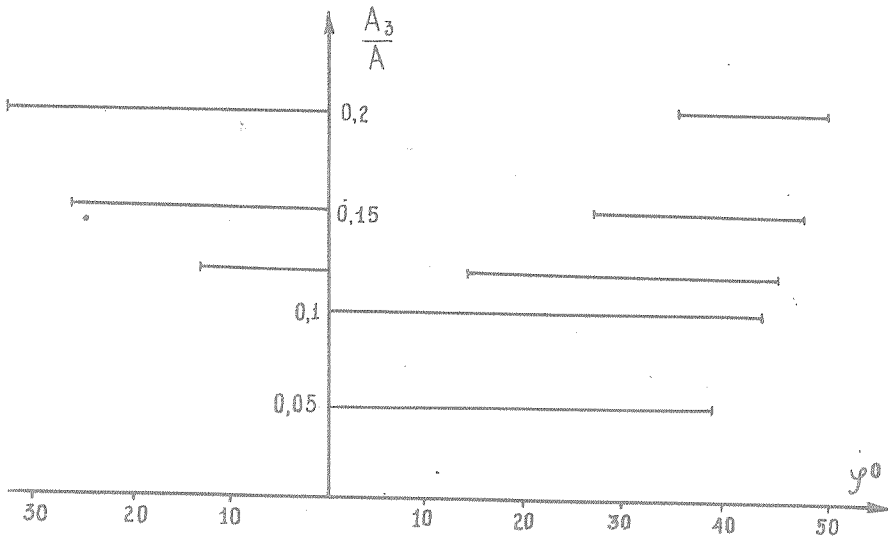
Основной характеристикой, определяющей устойчивость фазового движения частиц в микротроне, является величина шпура $v = (2 - 2\alpha) / 3$. Условию устойчивости фазового движения соответствует неравенство

$$- 2 < v < 2. \quad (4)$$

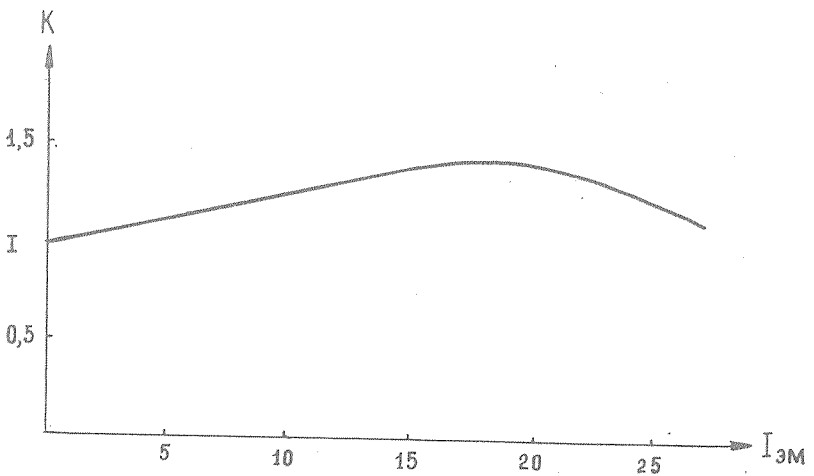
Если в резонаторе возбуждены только колебания E_{010} , неравенство (4) определяет хорошо известную область устойчивых равновесных фаз $0 < \varphi_S < 32^\circ$. При возбуждении в резонаторе дополнительно колебаний типа E_{011} ширина области устойчивых фаз будет зависеть от отношения амплитуд колебаний E_{010} и E_{011} и от сдвига фаз ψ между ними. На рис. 1 показаны области значений фаз, удовлетворяющих неравенству (4), при различных отношениях амплитуд колебаний E_{010} и E_{011} , полученные путем численных расчетов. Присутствие в резонаторе колебаний типа E_{011} оказывает заметное влияние на величину и положение области фазовой устойчивости. Так, при малых амплитудах колебаний E_{011} область устойчивости расширяется, а затем, по мере роста отношения A_3/A , распадается на две.

Полученная расчетная зависимость ширины области устойчивых фаз от отношения амплитуд A_3/A позволяет дать качественное объяснение экспериментальной зависимости коэффициента захвата от тока эмиссии I/I_0 . Действительно, величина коэффициента захвата частиц в микротроне, определяемая областью начальных фаз захвата, прямо связана с шириной области устойчивых фаз. В свою очередь амплитуда A_3 колебаний E_{011} , от величины которой, как было показано выше, зависят ширина и положение области устойчивости, является функцией ускоренного тока и, следовательно, тока эмиссии. Относительное изменение величины коэффициента захвата от тока эмиссии показано на рис. 2. Зависимость построена на основе данных, приведенных на рис. 1, и нормирована на величину коэффициента захвата при нулевом значении тока эмиссии.

В заключение заметим, что более точные количественные оценки влияния третьей гармоники ускоряющего напряжения на динамику частиц в микротроне могут быть получены только после численного



Р и с. 1. Зависимость ширины области равновесных фаз от отношения амплитуд третьей и основной гармоник ($\psi = 0$)



Р и с. 2. Зависимость коэффициента захвата от тока эмиссии (в относительных единицах)

расчета режимов ускорения, учитывающего ширину резонатора и пространственное распределение полей в нем.

Поступила в редакцию
27 октября 1978 г.

Л и т е р а т у р а

1. К. А. Беловишцев, А. В. Серов, Препринт ФИАН № 4, 1978 г.
2. Л. Д. Гольдштейн, Н. В. Зернов, Электромагнитные поля и волны. "Сов. радио", М., 1971 г.
3. А. А. Коломенский, Диссертация, ФИАН, 1950 г; ЖТФ, 30, 1347 (1960).