

ЗАТУХАНИЕ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ МНОГОКРАТНОМ ПРОХОЖДЕНИИ ЧАСТИЦЫ ЧЕРЕЗ МИШЕНЬ

В. Т. Блюхн, Л. Н. Кацауров, Л. П. Нечаева,

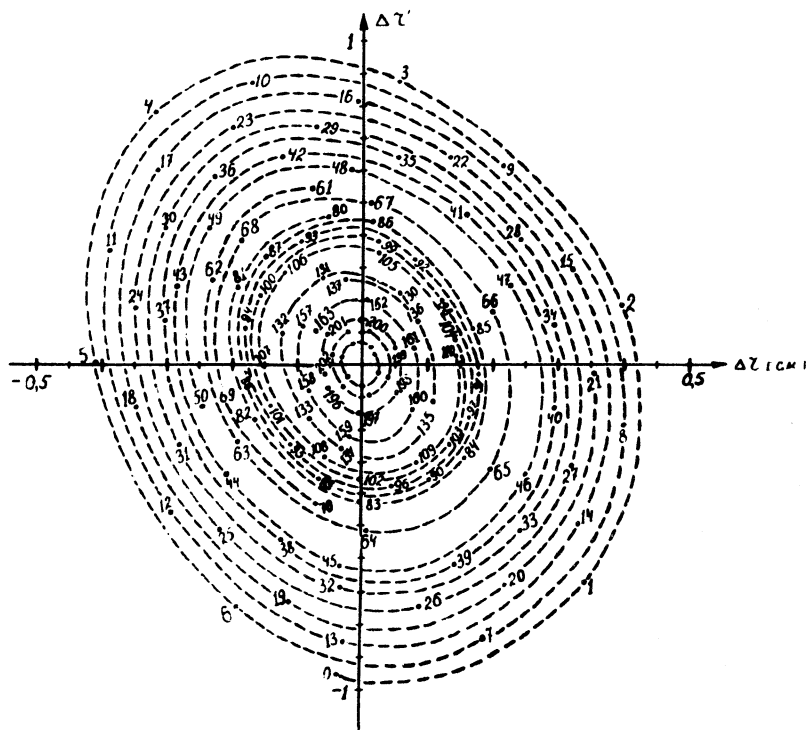
В. Я. Риктер, Д. К. Хохлов

Для малого изохронного циклотрона ИЛИ АН СССР на 500 кэВ по протонам /1/ на ЭВМ изучалось затухание бетатронных колебаний при многократном прохождении частиц через тонкую мишень. Тонкая локальная мишень помещена в середине промежутка между секторами. Ее внутренний край расположен на радиусе r . Протяженность мишени по радиусу 20 мм. Под режимом многократного прохождения (МП) здесь и в дальнейшем будем подразумевать такое движение частиц, при котором одна и та же частица пересекает мишень на каждом обороте, причем ее энергетические потери в мишени в среднем компенсируются приростом энергии на пелях дуанта. Среди траекторий МП имеются замкнутые равновесные орбиты, отличающиеся друг от друга своей энергией.

Ранее процесс затухания, обусловленный ионизационным трением в газе, заполнящем камеру ускорителя, рассматривался в работах А. А. Коломенского /2/, а также в работах Г. И. Будкера /3/, Д. М. Адо и В. И. Балбекова /4/ в связи с проблемой накопления частиц.

На рис. 1 приведены результаты расчета на ЭВМ фазовой диаграммы для одной из частиц пучка по уравнениям, описанным в работе /5/, с добавлением влияния ускоряющих щелей и мишени. Расчет проводился без учета рассеяния частиц на мишени, без учета эффекта перезарядки и в предположении принудительного синхронизма. По осям отложены отклонение радиальной координаты частицы Δr_n и ее производной $\Delta \dot{r}_n = \Delta (dr/d\theta)_n$ от соответствующих значений для равновесной орбиты МП, рассматриваемые как функция числа оборотов при фиксированном азимуте

наблюдения. Азимут наблюдения является азимут, на котором расположена мишень. Как известно, в отсутствие мишени и



Р и с. I. Фазовая диаграмма, изображающая бетатронные колебания частицы около равновесной орбиты многократного прохождения. Точки представляют собой величины $\Delta\gamma, \Delta\gamma'$ в момент пересечения частицей азимута наблюдения; цифры - номер оборота n . Энергия частицы совпадает с равновесной; $W_{ВХ} = 249,486$ кэВ, $\Delta W = 9,486$ кэВ.

ускоряющего напряжения на щелях дуанта точки $(\Delta\gamma_n, \Delta\gamma'_n)$ лежит в фазовой плоскости на некотором эллипсе. Если же имеется мишень и ускорительная щель (режим МП), то точки $(\Delta\gamma_n, \Delta\gamma'_n)$ лежат не на эллипсе, а на некоторой эллиптической спирали. Осц

этой спирали повернута на некоторый угол, а центр, к которому стремится спираль, соответствует радиусу и производной равновесной орбиты МП. Из рис. 1 легко определить частоту бетатронных колебаний, пользуясь соотношением

$$(\nu_T - 1)(n_2 - n_1) = n_b, \quad (1)$$

где n_1 и n_2 - числа оборотов, расположенных на одном радиусе-векторе фазовой диаграммы, n_b - число витков спиральной кривой на фазовой плоскости, ν_T - частота радиальных бетатронных колебаний. $\nu_T - 1 = 0,157$, что хорошо совпадает с величиной $\nu_T - 1 = 0,150$, определенной из обычных фазовых диаграмм /6/.

Необходимо пояснить физическую разницу между действием диссипативной силы трения в мишени и действием не диссипативной силы электрического поля. Если заменить мишень тормозящей целью, создающей равную по величине потерю энергии, то затухание исчезнет. Это объясняется тем, что цель в среднем изменяет (уменьшает) лишь продольную составляющую импульса частицы. Радиальная составляющая (в среднем) остается неизменной. Мишень же уменьшает импульс частицы по модулю, т.е. в одинаковой мере уменьшает как продольную, так и поперечную составляющие импульса. Уменьшение поперечной составляющей импульса как раз и означает затухание бетатронных колебаний.

Величину декремента затухания эллиптической спирали можно оценить теоретически. Обозначим величину потерь энергии частицы в мишени ΔW . Проходя через мишень, частицы не испытывают ни преломления, ни смещения. Соответственно, входные и выходные значения мгновенной амплитуды бетатронных колебаний x и ее производной по длине пути равновесной орбиты dx/ds совпадают

$$x_{\text{вых}} = x_{\text{вх}}, \quad \left. \frac{dx}{ds} \right|_{\text{вых}} = \left. \frac{dx}{ds} \right|_{\text{вх}}. \quad (2)$$

Иными словами, при использовании независимой переменной s мишень не влияет на величины x и dx/ds . Однако, в циклических ускорителях естественной независимой переменной является не s , а обобщенный азимут θ , связанный с s соотношением

$$\frac{d}{ds} = k_0 \frac{d}{d\theta}, \quad (3)$$

где k_0 - нормировочный коэффициент, изменяющийся на мишени так,
 10

как изменяется кривизна опорной траектории, т.е. обратно пропорционально импульсу

$$\frac{K_{0 \text{ ВХ}}}{K_{0 \text{ ВХ}}} = \frac{P_{\text{ВХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \approx \sqrt{\frac{W_{\text{ВХ}} - \Delta W}{W_{\text{ВХ}}}} \approx 1 - \frac{\Delta W}{2W_{\text{ВХ}}}. \quad (4)$$

После перехода в (2) к независимой переменной θ с помощью (3) и (4) получаем

$$x_{\text{ВХ}} \approx x_{\text{ВХ}}; \quad \left(\frac{dx}{d\theta} \right)_{\text{ВХ}} \approx \left(1 - \frac{\Delta W}{2W_{\text{ВХ}}} \right) \left(\frac{dx}{d\theta} \right)_{\text{ВХ}}. \quad (5)$$

Граничное условие (5) определяет элементарный закон затухания бетатронных колебаний при однократном прохождении мишени. Однако наличие в (5) меньшего единицы множителя $(1 - \Delta W/2W_{\text{ВХ}})$. Можно показать (доказательство за недостатком места опускаем), что элементарный закон (5) приводит к затуханию амплитуды бетатронных колебаний от оборота к обороту в среднем по закону

$$A(n) = A(n_0) \exp \left\{ - \frac{\Delta W}{4W} (n - n_0) \right\}, \quad (6)$$

где A - амплитуда бетатронных колебаний, n , n_0 - номера конечного и начального оборотов. Из (6) следует, что декремент затухания, отнесенный к одному обороту, равен в среднем

$$\Gamma = - \Delta W/4W. \quad (7)$$

Из рис. 1 можно определить значение $\Gamma = 0,00955$, что хорошо совпадает с его значением, определенным из (7) ($\Gamma = 0,00951$).

Описанное выше затухание бетатронных колебаний имеет большее значение при многократном прохождении пучка заряженных частиц через мишень, так как можно подобрать такие условия ускорения, при которых затухание бетатронных колебаний компенсирует уширение пучка за счет многократного рассеяния на мишени.

Поступила в редакцию
3 апреля 1972 г.

Л и т е р а т у р а

1. В. А. Гладышев, Л. Н. Кацауров, А. Н. Кузнецов, Е. М. Мороз, Л. П. Нечаева. Атомная энергия, 19, 442 (1965).
2. А. А. Коломенский. Атомная энергия, 19, 534 (1965).
3. Г. И. Будкер. Атомная энергия, 22, 346 (1967).
4. Ю. М. Адо, В. И. Балбеков. Атомная энергия (в печати).
5. А. Т. Матачун, В. А. Гладышев, Л. Н. Кацауров, Е. М. Мороз, Л. П. Нечаева. Труды ФИАН, 45, 7 (1969).
6. Л. Н. Кацауров, Е. М. Мороз, Л. П. Нечаева. Препринт ФИАН № 139, 1970 г.