

СТАТИСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ПОДАВЛЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

А.С.Щеулин

Предложен способ подавления начальных бетатронных колебаний пучка в циклическом ускорителе, заключающийся в последовательности фиксированных по силе воздействий на пучок. Разрешение на срабатывание соответствующих корректирующих магнитов вырабатывается при превышении амплитудой колебаний пучка определенного уровня и передается по хорде, обгоняя пучок, перемещающийся по дуге окружности. Вся совокупность инжектируемых пучков рассматривается как статистический ансамбль, и в рамках предложенного способа происходит последовательное уменьшение ширины функции распределения по амплитудам колебаний. Максимальный темп уменьшения ширины функции распределения составляет 3^N , где N – число корректирующих магнитов.

Работа выполнена в Общезинститутском научно-методическом отделении ОИЯИ.

The Statistical Method of Coherent Betatron Oscillations Suppression

A.S.Shcheulin

The new method of a beam initial betatron oscillations suppression in a cyclic accelerator is suggested. This method includes several numbers fixed by intensity action on a beam. Allowing for the corrective magnets switching is produced when the beam oscillation amplitude value exceeds a certain level. The corresponding operation signal propagates along a chord of the accelerator circle and appears in the point of the magnet before a beam which propagates along a circle arch. The suggested method considers all injected beams as a statistical ensemble and leads to decreasing the statistical distribution function on oscillation amplitudes width. The maximal rate of the distribution function width decreasing is 3^N , where N is a corrective magnets number.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division, JINR.

При инжекции пучка в циклический ускоритель неизбежны ошибки ввода, приводящие к когерентным колебаниям. В систему подавления этих колебаний обычно входят датчики положения, измеряющие отклонения центра масс пучка от равновесной орбиты, и ударные магниты с током, пропорциональным показаниям датчиков. Отрезок времени между моментами измерения положения и воздействия на пучок обычно составляет величину не меньше значения длительности одного оборота T_0 ¹¹. Однако в ряде случаев, например для УНК¹¹, быстрое развитие поперечной резистивной неустойчивости¹², особенно с учетом эффектов типа "head-tail"^{13,4}, вынуждает искать методы подавления начальных колебаний за время, меньшее T_0 . При этом возникают две трудности. Во-первых, необходимо передать информацию о пучке в точку расположения магнита до его появления там. Во-вторых, практически отсутствует время для подготовки генераторов (например, зарядки накопительных емкостей) к формированию достаточно мощных (сотни ампер) импульсов тока с амплитудой, линейно зависящей от показания датчиков положения.

Первая трудность преодолима при передаче сигнала по хорде (рис.1), соединяющей датчик и магнит, в то время как пучок движется по дуге окружности, подобно тому, как это сделано при стохастическом охлаждении¹⁵. Вторая, к сожалению, приводит к целому комплексу сложных технических проблем, связанных, в основном, с обеспечением линейной передаточной функции между показанием датчика и током в магните.

Технические трудности при создании системы ускоренного подавления начальных бетатронных колебаний могут быть существенно облегчены, если отказаться от линейности передаточной функции и перейти к статистическому подходу, в котором каждый инжектируемый в кольцо ускорителя макроимпульс рассмат-

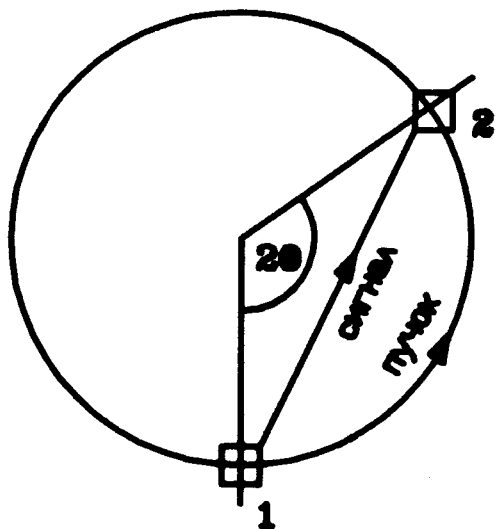
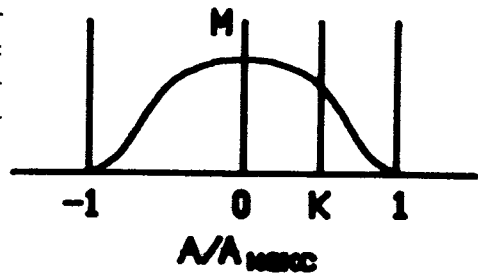


Рис. 1. Схема подавления колебаний: 1 — датчик положения пучка; 2 — ударный магнит.

Рис. 2. Функция распределения макроимпульсов по амплитудам колебаний: M — число макроимпульсов; K — пороговая относительная амплитуда для "срабатывания" ударного магнита.



ривается как событие, характеризующееся двумя случайными параметрами: начальными когерентным углом α и смещением A . Поскольку системы подавления колебаний, обусловленных углом и смещением, работают независимо, то достаточно рассмотреть работу одной из них.

Реально разброс начальных смещений укладывается в конечный интервал значений от $-A_{\text{макс}}$ до $A_{\text{макс}}$, или в относительных единицах $A/A_{\text{макс}}$ — от -1 до 1 (рис.2). Предлагается следующий алгоритм воздействия на пучок (для простоты рассмотрим случай $A/A_{\text{макс}} > 0$). В случае, если $A/A_{\text{макс}} < K$, то ток в магните равен нулю, если же $K \leq A/A_{\text{макс}} \leq 1$, то воздействие производится магнитным полем с амплитудой $H = H_{\text{макс}}(1 - K)$. Величина поля $H_{\text{макс}}$ соответствует подавлению колебаний с амплитудой $A_{\text{макс}}$. Естественно потребовать при этом, чтобы остаточная амплитуда не превышала K . Это приводит к двум условиям для выбора оптимального значения K — без изменения знака фазы колебаний (а) и с изменением (б):

$$1 - K_{\text{опт}} = K_{\text{опт}}, \quad (\text{а})$$

$$||2K_{\text{опт}} - 1|| = K_{\text{опт}}. \quad (\text{б})$$

В случае (а) $K_{\text{опт}} = 1/2$, а в случае (б) $K_{\text{опт}} = 1/3$. Если подобных систем на кольце будет несколько (N), с соответствующим уменьшением тока в магнитах ($1/2 I_{\text{макс}}$, $1/4 I_{\text{макс}}$, $1/8 I_{\text{макс}}$ и т.д. для случая (а) и $2/3 I_{\text{макс}}$, $2/9 I_{\text{макс}}$, $2/27 I_{\text{макс}}$ и т.д. для (б)), то минимальный темп подавления колебаний составит $A_{\text{ост}} = (1/2)^N A_{\text{макс}}$ и $A_{\text{ост}} = (1/3)^N A_{\text{макс}}$ для (а) и (б) соответственно. Заметим, что в предлагаемом алгоритме токи в магнитах фиксированы и не нужно времени для зарядки соответствующих накопительных емкостей генераторов, формирующих импульсы тока. Необходимо лишь время для включения коммутирующих элементов. Следует также упомянуть о влиянии возможных оши-

бок ΔK при дискриминировании сигналов датчика положения и выработке сигнала управления для "срабатывания" ударного магнита. Для того чтобы они не оказывали существенного влияния на работу системы, следует, по-видимому, задавать величину $A_{\text{макс}}$ для аппаратуры несколько большую, чем достигается реально на ускорителе:

$$A_{\text{макс. ап.}} \geq (1 + \Delta K) A_{\text{макс. эксп.}}$$

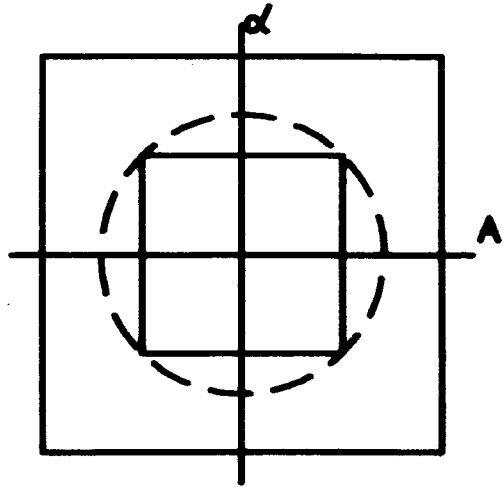
Разность времен $\Delta t = T_{\text{п}} - T_{\text{с}}$, где $T_{\text{п}}$ — время движения пучка по дуге окружности, а $T_{\text{с}}$ — распространения сигнала по хорде (см. рис.1), определяется формулой

$$\Delta t \approx \frac{2R}{c} (\theta - \sin \theta).$$

Предполагается, что релятивистский пучок (скорость $v_{\text{п}} \approx c$) и сигнал распространяются со скоростью света c . Для УНК $R \approx 7.10^3$ м и $\Delta t \approx 1$ мкс, достаточное для включения сильноточных коммутаторов (тиратронов, разрядников), достигается при $2\theta \approx 60^\circ$. Иными словами, можно выбрать в этом случае $N = 5$ и, в принципе, уменьшить амплитуду колебаний по сравнению с максимальной в течение одного оборота более чем в 30 раз для случая (а) и почти в 250 раз в случае (б).

Следует отметить ряд особенностей предлагаемого алгоритма подавления колебаний. По сути дела, речь идет о последовательном сужении статистической функции распределения отдельных макроимпульсов по амплитудам когерентных колебаний после прохождения каждого магнита. Это позволяет назвать предлагаемый способ статистическим. Кроме того, указанная выше оценка темпа подавления является достаточно приближительной. Это связано, в основном, с двумя обстоятельствами. Во-первых, в каждом отдельном случае амплитуда колебаний будет уменьшаться быстрее, чем следует из вышеприведенных формул (например, если начальное отклонение составит $2/3 A_{\text{макс}}$, то уже после первого магнита в случае (б) амплитуда будет равна нулю). С другой стороны, в реальных условиях инжектируемый пучок имеет не только начальное отклонение, но и начальный угол, также вносящий вклад в результирующую амплитуду. Статистические веса обоих факторов определяются многими параметрами. В простейшем случае их равенства и статистической независимости начальных угла и амплитуды на фазовой плоскости (α, A) все макроимпульсы будут попадать в область, ограниченную прямоугольником

Рис. 3. Фазовые "портреты" совокупности инжектируемых макроимпульсов в точке инъекции (внешний прямоугольник) и после прохождения пары ударных магнитов (внутренний прямоугольник).



(рис. 3). При воздействии ударного магнита по предлагаемому алгоритму граница начальной области переходит в границу новой. В результате непосредственно после прохождения двух магнитов (скорректировавших начальные угол и амплитуду) будем иметь прямоугольник, подобный данному. Поскольку следующий магнит, корректирующий угол (или амплитуду), отстоит от предыдущего на расстояние, кратное целому числу полувольт бетатронных колебаний, то в результате на фазовой плоскости получим серию вращающихся подобных прямоугольников. Таким образом, максимальная амплитуда будет в $\sqrt{2}$ раз превышать величину, определяемую для остаточных амплитуд, то есть

$$A_{\text{ост}} = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2}\right)^N A_{\text{макс.}}$$

для случая (а) и

$$A_{\text{ост}} = \sqrt{2} \left(\frac{1}{3}\right)^N A_{\text{макс.}}$$

для случая (б). Это иллюстрируется пунктирной линией на рис.3, являющейся траекторией на фазовой плоскости макроимпульса с изображающей точкой в углу квадрата после прохождения первой пары магнитов.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить признательность И.Н.Иванову, А.Б.Кузнецову и В.А.Мельникову за плодотворные дискуссии.

Литература

1. Агеев А.И. и др. — В сб.: Труды 10 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т.2, с.430.
2. Балбеков В.И. — В сб.: Труды 9 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т.2, с.360.
3. Жабицкий В.М. и др. — ОИЯИ, 9-89-831, Дубна, 1989.
4. Диканский Н.С., Скринский А.Н. — АЭ, 1983, т.21, с.176.
5. Van der Meer S. — Science, 1985, v.230, No.4728, p.900.

Рукопись поступила 26 марта 1990 года.