

ГРУППИРОВКА ЧАСТИЦ УСКОРЯЮЩИМ ПОЛЕМ В ПРОТОННОМ СИНХРОТРОНЕ ИФВЭ

Г.Г.Гуров, Б.К.Шембель

Институт физики высоких энергий, Серпухов

В настоящее время система питания электромагнита протонного синхротрона ИФВЭ позволяет производить инъекцию только при быстро нарастающем магнитном поле. Равновесная фаза при этом равна 70° и при типичном значении импульсного разброса инжектируемого пучка $\pm 0,25\%$ расчетный коэффициент захвата в установившуюся сепаратрису составляет 59% .

Для повышения эффективности захвата используется предварительная фазовая группировка пучка, основанная на принципе работы группирователя линейного ускорителя ^{1,2/}.

Основными элементами группирователя линейного ускорителя являются группирующий резонатор и дрейфовый промежуток. В синхротроне функцию группирующего резонатора выполняет основное ускоряющее поле, дрейф частиц происходит при его выключении в процессе свободной циркуляции пучка. На рис. I схематически изображен процесс группировки:

- а) начальное положение пучка и области захвата на фазовой плоскости (при инъекции);
- б) форма пучка после воздействия группирующего ВЧ напряжения;
- в) сгруппированный пучок по окончании дрейфа, в момент захвата.

Используя подобный принцип, в некоторых случаях можно по аналогии с группирователями линейных ускорителей осуществлять более

эффективную группировку, в частности, многократную группировку и группировку несинусоидальным полем.

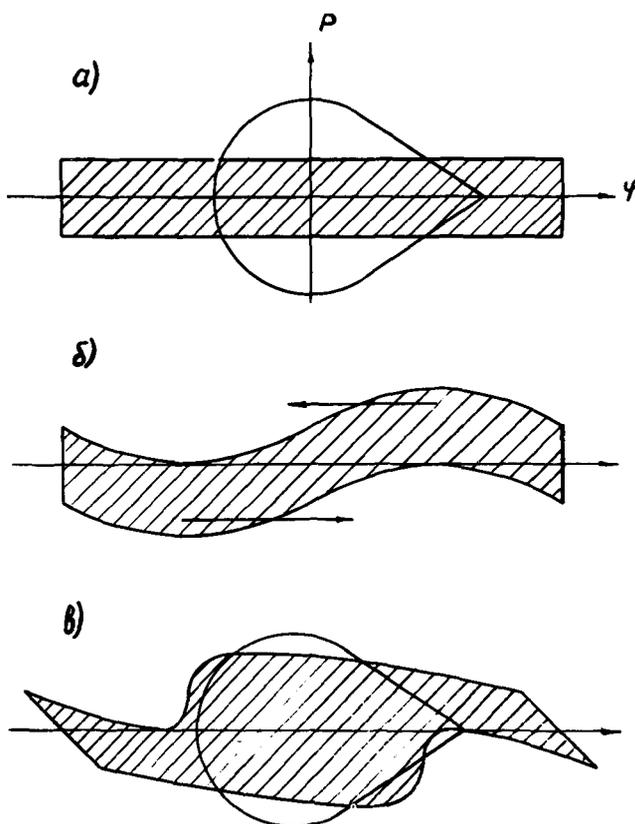


Рис. I. Фазовая группировка пучка.

В общем случае аналитически невозможно оптимизировать процесс группировки, поэтому режим рассчитывается численно. Для приведенных выше условий инжекции в быстро нарастающее магнитное поле необходимое время воздействия группирующего ВЧ напряжения составляет 0,1 периода синхротронных колебаний, время дрейфа — 0,35 периода. Расчетный коэффициент захвата при этом равен 81%, что в 1,37 раза выше, чем при инжекции в установившуюся сепаратрису. Многократная группировка (аналог многоазорного группирователя) дает заметное преимущество только при весьма малом импульсном разбросе пучка — менее 0,1 от разброса сепаратрисы.

Выключение ВЧ поля на период дрейфа и последующее его включе-

ние должно происходить за время, существенно меньшее периода фазовых колебаний. Переходные процессы установления амплитуды в ускоряющих устройствах синхротрона ИФВЭ не удовлетворяют этому требованию ^{3/}, поэтому режим дрейфа осуществляется путём быстрого смещения радиочастоты на величину, превышающую частотный размер сепаратрисы. При таком смещении несинхронное ВЧ поле не ускоряет пучок в целом, однако вызывает колебания энергии отдельных частиц. Чтобы не ухудшать качество группировки, амплитуда колебаний должна быть значительно меньше разброса пучка. По допустимой величине этих колебаний из фазового уравнения ^{4/} определяется необходимый сдвиг частоты

$$\Delta f = \left(\frac{\Delta p_c}{p}\right)^2 \frac{\mathcal{K} \beta^2 f}{2 C_c} \left(\frac{\delta p}{p}\right)^{-1}.$$

Здесь $\frac{\Delta p}{p} = 0,51\%$ - относительный импульсный разброс сепаратрисы; $\mathcal{K} = 4,4$ - логарифмическая производная частоты по энергии; $\beta = 0,43$ - относительная скорость частиц; $f = 2,6$ МГц - радиочастота; $C_c = 0,52$ - параметр сепаратрисы установившегося режима; $\frac{\delta p}{p}$ - допустимое отклонение импульса частицы. Цифры относятся к ускорителю ИФВЭ.

$\frac{\delta p}{p}$ принято равным 0,2 от импульсного разброса пучка, этому соответствует Δf около 54 кГц.

Смещение частоты производится в задающем генераторе ускоряющей системы, при этом, чтобы фаза ВЧ по окончании дрейфа вернулась к прежнему (синхронному) значению, фазовый набег несинхронной частоты за время дрейфа должен быть кратным 2π . Это обеспечивается при выполнении дополнительного условия на Δf :

$$\Delta f = \frac{n}{T_{др}} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$T_{др} = 50$ мкс - время дрейфа.

При большом смещении частоты возможно попадание пучка в ускоряющее поле другой кратности. В синхротроне ИФВЭ кратные гармоники при инъекции отстоят друг от друга на 89 кГц, однако ускоряющая система, состоящая из 53 ускоряющих станций, распределена по азимуту ускорителя таким образом, что ближайшие гармоники имеют амплитуду менее 20% от основной и не образуют областей захвата (при номинальном значении H). Это позволяет выбирать Δf в широких пределах. Принято $\Delta f = 60$ кГц.

На рис.2 показано наложение осциллограмм интенсивности для обычного режима захвата и для группировки. Видно, что группиров-

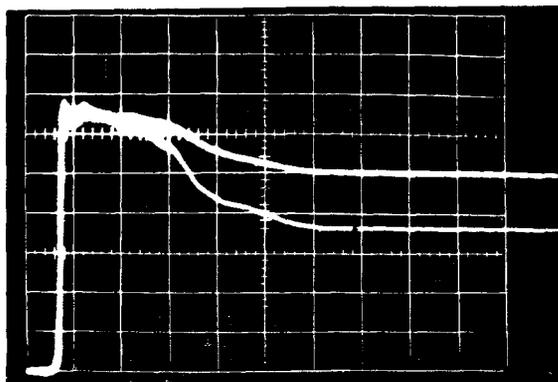


Рис.2. Осциллограммы интенсивности при включенной и выключенной группировке. Скорость развертки 100 мкс/дел. Масштаб по вертикали $2 \cdot 10^{11}$ протонов/дел.

ка повышает коэффициент захвата с 55 до 77% (расчетные значения 59 и 81% соответственно). Группировка также значительно улучшает согласование пучка с областью захвата. На рис.3 показаны осциллограммы изменения плотности объемного заряда пучка в начальной стадии ускорения при однооборотной инжекции.

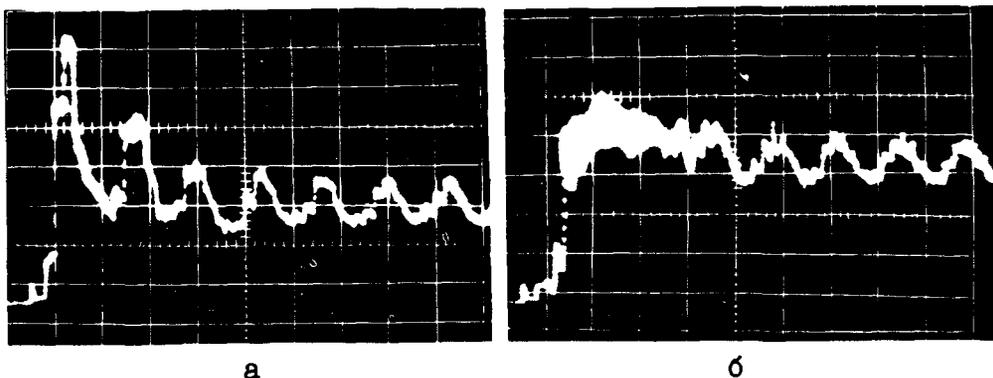


Рис.3. Изменение плотности пучка в процессе ускорения: а - обычный захват; б - захват с группировкой. Скорость развертки 50 мкс/дел.

При группировке колебания плотности и ее максимальное значение существенно уменьшаются. Соответственно уменьшается вызываемый объемным зарядом пучка некогерентный кулоновский сдвиг бетатронных частот, являющийся одной из основных причин ограничения интенсивности.

Благодаря повышению коэффициента захвата и улучшению согласования пучка, группировка позволила повысить максимальную интенсивность ускорителя ИФВЭ на 25%.

В заключение авторы благодарят А.А.Наумова за постоянное внимание к работе и её поддержку, а также сотрудников службы оперативного управления за активное участие в экспериментах.

Л и т е р а т у р а

1. Д.В.Каретников, И.Н.Сливков и др. Линейные ускорители ионов, М., Госатомиздат, 1962.
2. А.Лихтенберг. Динамика частиц в фазовом пространстве, М., Атомиздат, 1972.
3. А.И.Вагин и др. Труды I Всесоюзного совещания по ускорителям (1968), т.2, стр.106, М., ВИНТИ, 1970.
4. А.А.Коломенский, А.Н.Лебедев. Теория циклических ускорителей, М., Физматгиз, 1962.