

КОМПРЕССИЯ ИМПУЛЬСА ТОКА МОСКОВСКОЙ
МЕЗОННОЙ ФАБРИКИ

Ю.П.Севергин, И.А.Шукейло
Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им.Д.В.Ефремова
Ленинград, 188631

1. ВВЕДЕНИЕ

В докладе рассмотрен один из режимов преобразования временной структуры импульса тока пучка Московской мезонной фабрики /1/. Путем многооборотной перезарядной инжекции макроимпульса тока линейного ускорителя в накопительное кольцо и последующего однооборотного вывода пучка из него предполагается осуществить компрессию импульса тока. Основная цель преобразования структуры ускоренного пучка - обеспечение необходимых условий для генерации мощных импульсных потоков нейтронов.

Следующие параметры линейного ускорителя и накопителя являются существенными в дальнейшем рассмотрении:

Линейный ускоритель	
Кинетическая энергия ионов	Мэ
Импульсный ток пучка	50 мА
Длительность макроимпульса	100 мкс
Частота следования макроимпульсов	100 Гц
Относительный импульсный разброс	$\pm 2 \cdot 10^{-3}$
Накопитель	
Периметр	104,6 м
Период обращения протонов	442 нс
Число накопленных витков тока за один импульс линейного ускорителя	226
Азимутальная плотность протонов в кольце	$3,0 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-1}$
Эмиттанс накопленного пучка	$3 \pi \text{ см} \cdot \text{мрад}$

2. КОМПРЕССИЯ ИМПУЛЬСА ТОКА

Компрессия достигается за счет накопления и последующего однооборотного вывода пучка. Орбита накопителя заполняется протонами не полностью. Необходимый для импульсного вывода зазор (около 100 нс) образуется путем периодического прерывания пучка перед впуском его в линейный ускоритель. Длитель-

ность накопленного сгустка может варьироваться в пределах 50-350 нс. Верхний предел длительности импульса определяется техническими возможностями импульсной системы вывода, нижний - условиями постановки нейтронных работ и спецификой принятого способа накопления.

В процессе накопления протонов фазовая протяженность сгустков должна сохраняться либо изменяться незначительно. Для этой цели обычно используется специальное В.Ч. электрическое поле. Если, однако, магнитную структуру кольца сформировать так, чтобы выполнялось условие

$$\alpha = \gamma^{-2}, \quad (1)$$

где α - коэффициент расширения орбит, а γ - приведенная энергия протонов, то период обращения частиц не будет зависеть от их импульса. При этом В.Ч. система оказывается излишней. Такой подход к задаче поддержания сгустковой структуры пучка, циркулирующего в постоянном магнитном поле, экспериментально изучался в ЦЕРНе /2/.

Накопление пучка в изохронном режиме позволяет сократить стоимость всей установки и улучшить условия циркуляции интенсивного пучка за счет снижения продольного импеданса связи пучка с его окружением.

Параметры ускоренного пучка мезонной фабрики и особенности формирования сгустков в накопителе таковы, что условия (1) достаточно выполнить лишь весьма приблизительно. Например, отклонение α от установленного значения на 10% приводит к удлинению сгустка на 3,5 м за время накопления 100 мкс. Это вполне допустимо, если не ставится задача образования сгустков метровой длины.

Даже при точном выполнении соотношения (1) остается ряд причин, способствующих удлинению сгустков, в первую очередь, зависимость периода обращения протонов от квад-

рата импульса и от эмиттанса пучка. В конкретных условиях нашей задачи они не изменяют заметно длины сгустка.

Основная, практически неустранимая причина зависимости периода обращения протонов от импульса — влияние поперечного электромагнитного поля самого пучка. Его воздействие можно интерпретировать как вариацию внешнего поля фокусирующей системы накопителя, в результате чего увеличивается α в зависимости от локальной плотности заряда в том месте, где находится частица. При равномерном накоплении макроимпульса коэффициент расширения орбит изменяется на величину $\Delta\alpha$, $0 \leq \Delta\alpha \leq 0,018$, что вполне допустимо.

Спецификой циркуляции сгруппированного пучка в изохронной магнитной системе оказывается низкий порог развития микроволновой неустойчивости: $I_0 \sim \eta = \alpha - \gamma^{-2}$ /3/. Условия для ее развития могут возникнуть даже в начальной фазе процесса накопления, если (I) выполнить точно. Однако инкременты развития τ_n оказываются достаточно большими, особенно для низких мод n :

$\tau_n \sim n^{-1} \eta^{-1/2}$ /4/. При продольном импедансе Z_c/n , составляющем несколько десятков Ом, $n = 10^2$, $\eta = 10^{-2}$ время развития неустойчивости существенно превосходит время накопления.

Весьма короткое время накопления — 100 мкс — вселяет уверенность в осуществимости компрессии сгустков без применения в Ч — группирователя в магнитном кольце.

3. МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА И СИСТЕМА ВЫВОДА НАКОПЛЕННОГО ПУЧКА

Отличительной особенностью быстрого вывода частиц из накопителя является высокая частота работы ударного магнита — 100 Гц. При этом в магнитной структуре необходимо стремиться к минимальному значению силы ударного магнита. Величина углового отклонения ψ в ударном магните, необходимая для пространственного разделения в радиальном направлении циркулирующего пучка и выводимого, определяется соотношением:

$$\psi > \frac{2(\beta_1 \epsilon_x + \psi_1 \Delta p_m / p_0)}{\beta_1 \beta_0 \sin \Delta \mu} \quad (2)$$

где β_1 и ψ_1 — характеристические функции на азимуте выводного септума, β_0 — на азимуте ударного магнита, Δp_m — набег фазы радиальных колебаний между ударным магнитом и выводным септумом.

Первый шаг к минимуму ψ должен быть сделан путем обращения в нуль ψ_1 . В нашем случае это особенно важно, так как $\alpha = \alpha_{кр} = 0,371$ и среднее значение $\bar{\psi}$ в основных поворотных магнитах равно 6 м. Если элемент периодичности не является ахроматичным, то $\psi \approx 6$ м сохраняется практически на всех азимутах. В результате пучок имеет дополнительное радиальное уширение 2,4 см при $\Delta p_m / p_0 = 2 \cdot 10^{-3}$.

Дальнейшая оптимизация должна быть выполнена, исходя из максимального значения функции $\beta_0^{1/2} \sin \Delta \mu$.

При выборе типа магнитной структуры эти требования были учтены. Схема накопительно-го кольца представлена в докладе /5/.

Магнитная структура содержит два элемента периодичности. Каждый элемент выполнен в виде симметричной ахроматичной системы с отдельным регулированием параметров поперечного и продольного движений. На рис. I представлены характеристические функции элемента периодичности β_x , β_z и ψ , соответствующие разным значениям α ; число бета-тронных колебаний на оборот составляет

$$\nu_x = 2,4; \quad \nu_z = 2,3.$$

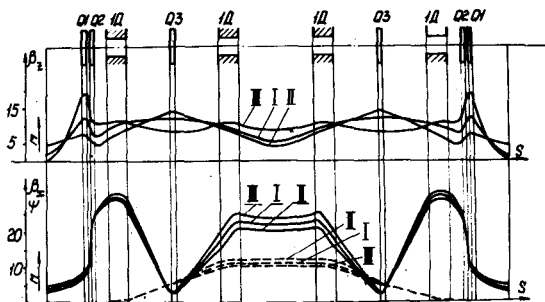


Рис. I. Характеристические функции элемента периодичности β_x , β_z , ψ соответствующие различным значениям α : $\alpha^I = 0,37$, $\alpha^{II} = 0,42$, $\alpha^{III} = 0,32$

Квадрупольные линзы Q I и Q 2, опущены на участках, где $\psi = \psi' = 0$. Поворотная часть элемента периодичности построена в соответствии с рекомендациями

работы /6/. Квадрупольные линзы Q3 позволяют в широких пределах изменять α , не нарушая при этом ахроматичности всего периода.

В изохронном режиме нелинейные эффекты, квадратичные по $\Delta p/p_0$ и зависящие от эмиттанса, приводят за время инжекции к удлинению сгустка на I м при допуске на неоднородность поля в основных магнитах $\pm 1 \cdot 10^{-4}$.

В магнитную структуру введены секступольные линзы ISP по четыре пары на элементе периодичности. Включение линз позволяет полностью устранить размытие сгустка из-за нелинейных эффектов второго порядка, при этом одновременно компенсируется хроматичность. Параметры секступольных линз выбраны из условия, что неоднородность поля в основных поворотных магнитах будет не хуже $\pm 3 \cdot 10^{-4}$.

Вывод частиц осуществляется на том же участке, что и ввод H^- в кольцо на перезарядную мишень /5/. Несмотря на это, система инжекции и система быстрого вывода не связаны между собой. Дело в том, что ударный магнит ЗК и выводной септум ЗС расположены на азимутах, где отсутствует возмущение равновесной орбиты на период инжекции /7/.

На рис.2 показана зона вывода пучка. Цифрой 1 обозначен пучок в радиальной плоскости при выключенных бамп-магнитах 2В, которые создают локальное возмущение равновесной орбиты на время инжекции.

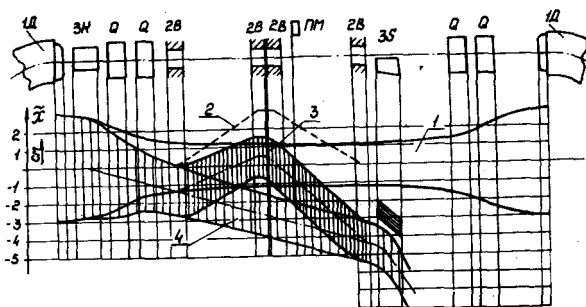


Рис.2. Зона вывода пучка.

Цифрой 2 обозначена возмущенная осевая траектория при включенных магнитах 2В. Цифрами 3 и 4 обозначены выводимый пучок для двух крайних случаев: 3 – бамп-магниты 2В включены, 4 – выключены. Из рис.2 видно, что параметры выводимого пучка на входе в септум одни и те же и не зависят от величины поля в магнитах 2В.

Закон изменения поля в магнитах 2В выбирается из условия оптимального заполнения и формирования поперечного фазового объема и не влияет на быстрый вывод.

Другой особенностью системы вывода является то, что расположение ударного магнита и выводного септума практически не зависит от частот бетатронных колебаний. Это объясняется тем, что на участке от ударного магнита ЗК до выводного септума установлены две квадрупольные линзы, определяющие частоты бетатронных колебаний, но их воздействия на отклоненный пучок мало, так как они расположены рядом с ударным магнитом. Смещение центра пучка относительно равновесной траектории на входе в септум-магнит ЗС $\Delta r = 800 \varphi$ см, где φ – угол отклонения частиц в ударном магните.

Ударный магнит состоит из двух токовых шин с ферритовым сердечником. Эффективная длина магнита 60 см. Рабочая апертура $2r \times 2z = 6 \times 4$ см². Максимальное значение поля – 0,055 Т. Предельный угол отклонения – $8 \cdot 10^{-3}$ рад.

Выводной септум представляет собой многовитковую токовую перегородку толщиной 1,2 см. Рабочая апертура $2r \times 2z = 14 \times 6,5$ см². Максимальное значение поля в апертуре – 0,9 Т. Эффективная длина – 55 см. Предельный угол отклонения 7° .

ЛИТЕРАТУРА

1. Грачев М.И. и др. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. I. – Дубна, 1985, с.343.
2. R.Cappi, J.P.Delahaye, K.H.Reich IEEE Trans. on Nucl.Sci., V.28, No.3, p.2389, 1981.
3. E.Keil, W.Shnell. CERN-ISR-TN-RF/69-48.
4. B.Zotter. CERN-ISR-GS/76-11.
5. Грачев М.И. и др. Накопитель протонов Московской мезонной фабрики. – Труды настоящей конференции, т. I, с.264.
6. Басаргин Ю.Г., Севергин Ю.П. ЖТФ, 1972, т.42, с.1727.
7. Севергин Ю.П., Юшко Г.П. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Т. I. – Дубна, 1985, с.356.