

Модернизация системы медленного вывода из У–70

Ю.Г. Каршев, А.В. Максимов, Е.Ф. Троянов, Ю.С. Федотов
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Рассмотрена возможность модернизации системы резонансного медленного вывода протонного пучка из У-70 путем добавления в магнитную структуру ускорителя квадрупольных линз для достижения эффективности вывода более 90%.

Введение

Существующая схема медленного вывода пучка протонов из ускорителя У–70 включает в себя электростатический дефлектор ЭД–106 в 106-м прямолинейном промежутке (ПП) и два отклоняющих септум-магнита ОМ–24 и ОМ–26 в 24- и 26-м промежутках соответственно [1]. Эффективность медленного вывода зависит в основном от потерь пучка во время вывода на первых выводных элементах: электростатическом дефлекторе и первом отклоняющем септум-магните. Потери на дефлекторе зависят от механической толщины его перегородки и увеличения ее эффективной толщины за счет углового разброса пучка, забрасываемого в дефлектор системой резонансной раскачки. Величина заброса пучка ограничена апертурами выводных устройств и не может быть сделана достаточно большой для уменьшения потерь. Потери на первом септум-магните зависят от эффективной толщины его ножа и величины зазора между циркулирующим пучком и пучком, отклоненным электростатическим дефлектором. Септум-магнит ОМ–24 двухсекционный с толщиной ножа 2 мм по металлу и эффективной толщиной около 2.4 мм.

В существующей схеме медленного вывода достигнута эффективность 85–90%. При этом расчетные потери на дефлекторе составляют 4÷5%. Для повышения эффективности вывода при ограниченной силе дефлектора необходимо уменьшать величину углового разброса пучка у дефлектора так, чтобы отклонение пучка дефлектором превышало угловой разброс выводимого пучка. Это одновременно приводит к уменьшению потерь на самом дефлекторе за счет уменьшения его эффективной толщины.

1. Модернизация схемы медленного вывода

Угловой разброс забрасываемого в дефлектор пучка определяется фазовыми траекториями для максимальной амплитуды, зависящей от его эмиттанса, и минимальной (нулевой) амплитуды (рис. 1) и равен, если раскачка происходит по направлению огибающей [2],

$$\Delta r'_{106} = \frac{\pi}{\sqrt{3\pi\sqrt{3}}} \frac{\sqrt{\varepsilon_r c}}{|\varphi|_{r106}}, \quad (1)$$

где ε_r — радиальный эмиттанс пучка; $c = 1$ м·рад — нормировочный коэффициент; $|\varphi|$ — модуль функции Флоке.

Как видно из (1), уменьшить угловой разброс можно увеличением $|\varphi|$ в месте расположения дефлектора. Это достигается введением в магнитооптическую структуру ускорителя дополнительных квадрупольных линз. Для локализации возмущения огибающей необходимо использовать как минимум два квадрупольных с набегом фазы между ними равным нечетному числу π .

Рассмотрены несколько вариантов расположения дополнительных квадруполь в прямолинейных промежутках ускорителя. Наилучшие результаты дает вариант расположения в 92 и 110 ПП. Силы линз $k = \frac{G \cdot l}{B_0 \cdot R_0}$ выбраны так, чтобы можно было увеличить $|\varphi|_{r106}$ до 1.5 раз, и их техническая реализация не представляла бы трудностей. В 38 ПП имеется квадруполь системы резонансной раскачки, используемый для наведения на рабочий резонанс медленного вывода. Электростатический дефлектор ЭД-106 имеет длину 3 м и напряженность электрического поля до 80 кВ/см, что обеспечивает отклонение заброшенного в него пучка на угол $\Delta r'_{106} = -0.34$ мрад. Для эмиттанса ускоренного пучка $\varepsilon_r = 2$ мм·мрад угловой разброс у дефлектора в настоящее время составляет ~ 0.3 мрад, а в возмущенной структуре — ~ 0.2 мрад и меньше отклонения пучка дефлектором, что обеспечит достаточное разделение циркулирующего и выводимого пучков. Линза 110 ПП дает дополнительное отклонение выводимого пучка, увеличивая заброс в септум-магнит ОМ-24. Дополнительное отклонение в 24-м промежутке из-за действия этой линзы равно

$$\Delta r_{24} = -m_{12(106-110)} \cdot m_{12(110-24)} \cdot k_{110} \cdot \Delta r'_{106} = -4.3 \text{ м.м.}, \quad (2)$$

где $m_{12(106-110)} = 23$ м и $m_{12(110-24)} = -25$ м — элементы матрицы передачи от 106 до 110 и от 110 до 24 прямолинейных промежутков соответственно.

Увеличение огибающей в месте расположения дефлектора требует увеличения амплитуды резонансной гармоники, возбуждаемой четырьмя секступольными линзами в ПП 12; 42; 72; 102. При радиальной апертуре дефлектора 20 мм величина заброса в него не должна превышать $\Delta A = 15 \div 16$ мм, чтобы избежать потерь на внешней стенке его апертуры. Величина амплитуды резонансной 29-й гармоники квадратичной нелинейности $A_{29} = \frac{1}{c} \int_0^L \frac{1}{2B_0 R_0} \frac{d^2 B}{dr^2} |\varphi|^3 e^{-i29 \cdot 2\pi \cdot \frac{x}{L}} dx$ при этом должна быть не менее $|A_{29}| = \frac{4}{3} \frac{\Delta A}{A_1 A_2} |\varphi|_{r106} \simeq 120$, где $\Delta A = 16$ мм, $A_1 = 28$ мм — расстояние перегородки дефлектора от оси пучка; $A_2 = A_1 + \Delta A$. Для эмиттанса выводимого пучка $\varepsilon_r = 2$ мм·мрад ширина резонансной полосы равна

$$\delta_{pez} = \frac{|A_{29}|}{4\sqrt{3\pi\sqrt{3}}} \sqrt{\frac{\varepsilon_r}{c}} = 0.0105. \quad (3)$$

Численное моделирование процесса резонансной раскачки показало (см. рис. 1–4) хорошее совпадение с теоретическими оценками. Хроматичность при расчетах составляла $\xi_r \simeq -17$, $\xi_z \simeq -5$. Мгновенный импульсный разброс в выводимом пучке составляет $\frac{\Delta p}{p} = \frac{\delta_{pez}}{\xi_r} \simeq 6.5^{-4}$. Расчеты проводились с учетом локальных искажений замкнутой орбиты, необходимых для смещения пучка во время вывода к перегородкам ЭД-106 до -65 мм, ОМ-24 — до -65 мм и ОМ-26 — до -80 мм [1]. Существующие секступольные линзы резонансной раскачки с запасом обеспечивают требуемый режим вывода.

На рис. 1–4 представлены результаты численного моделирования резонансной раскачки в системе медленного вывода в У-70. На рис. 1а показаны границы фазовой области пучка в радиальной плоскости, заброшенного в ЭД-106, на рис. 1б — полная картина раскачки в ПП 106. На рис. 2 приводятся фазовые плоскости при раскачке в существующей системе (а) и в модернизированной (б). На рис. 3а показана радиальная фазовая плоскость и на рис. 3б — поперечные размеры пучка в 26-м прямолинейном промежутке.

Как видно из этих рисунков, в промежутке 24 зазор между циркулирующим и выводимым пучками составляет около 6 мм, а в промежутке 26 — около 30 мм. Этого достаточно для размещения в этих зазорах токовых перегородок толщиной 2.4 и 14 мм [1]. При достаточно аккуратной настройке вывода можно практически избежать потерь пучка на них! На рис. 3б видно увеличение вертикальных размеров пучка при увеличении радиальных в рабочем резонансе системы вывода. Это проявление нелинейных резонансов связи $2Q_z + Q_r = 29$

и $2Q_z - Q_r = 10$, причем последний в модернизированной системе возбуждается из-за несимметричности системы возбуждения гармоники рабочего резонанса $3Q_r = 29$. Во избежание дополнительных потерь вертикальная апертура септум-магнита ОМ-26 должна быть не менее 30 мм.

Увеличение эффективной толщины перегородки ЭД за счет углового разброса пучка на ней зависит от ее ориентации относительно раскачанного пучка. При разбросе $\Delta r' = 0.2$ мрад и угле отклонения в дефлекторе $\Delta r'_{\text{ЭД}} = 0.34$ мрад оптимальным является случай, когда перегородка параллельна частицам с максимальным углом. В этом случае увеличение толщины перегородки составляет

$$\Delta r = \frac{1}{2a} (\Delta r'_{106})^2 = 0.21 \text{ мм}, \quad (4)$$

где $a = \frac{E(B/\text{м})}{P(\text{ГэВ}/c)} \cdot 10^{-9} = 0.113$ мрад/м характеризует отклоняющую силу электростатического дефлектора, и суммарная эффективная толщина равна $h = 0.36$ мм. При такой величине потери на перегородке составят для минимальных амплитуд

$$\rho = h \left(\frac{1}{\Delta A} + \frac{1}{A_1} \right) \simeq 3.7\%. \quad (5)$$

Для максимальных амплитуд ($\varepsilon_r = 2$ мм·мрад) потери составят 5.8%, а в среднем — 4÷5%. Результаты численного моделирования показали верность этой оценки.

Обычно процент потерь в реальном случае больше расчетных величин и сильно зависит от качества настройки режима вывода. Более реалистической будет оценка потерь порядка 5÷6% на всей трассе канала вывода. При расчетах потерь считалось, что частица, попавшая в сечение эффективной толщины перегородки, теряется. Как показывают оценки процессов ядерного взаимодействия с перегородкой из вольфрама, многократного рассеяния и потери энергии в веществе перегородки, только очень малая доля частиц, вышедших из перегородки, останется в фазовой области выводимого пучка. “Прозрачность” перегородки дефлектора для протонов 70 ГэВ не превышает 5%, что практически не влияет на величину эффективности вывода пучка.

Заключение

Как следует из вышесказанного, небольшое усложнение системы резонансной раскачки — добавление в структуру ускорителя У-70 двух квадрупольных линз — может существенно увеличить эффективность медленного вывода протонного пучка и достичь величины ~95%. Для реализации данного предложения разработаны чертежи квадрупольных линз и начато их изготовление.

Список литературы

- [1] А.Г. Афонин, В.И. Дианов, А.В. Максимов. Оптимизация схемы медленного вывода протонного пучка из У-70. Препринт ИФВЭ 92-121, Протвино, 1992.
- [2] Ю.С. Федотов. Использование нелинейных резонансов бетатронных колебаний для медленного вывода частиц из ускорителей с сильной фокусировкой. Препринт ИФВЭ СКУ 71-63, Серпухов, 1971.

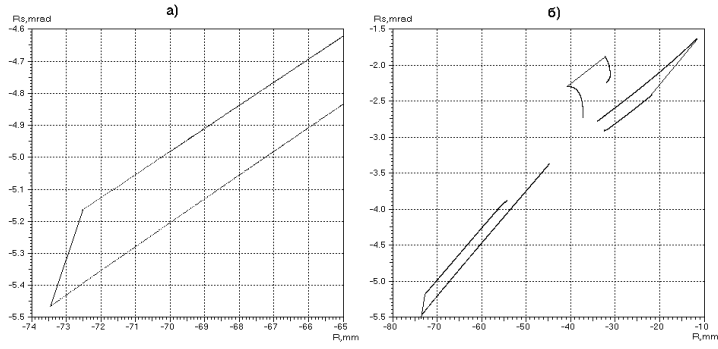


Рис. 1: Радиальные фазовые плоскости раскачанного пучка в ПП106: а) заброшенного в электростатический дефлектор, б) полная картина фазовой плоскости.

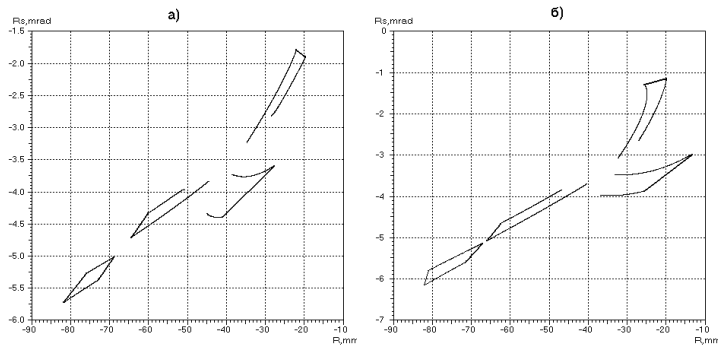


Рис. 2: Радиальные фазовые плоскости раскачанного пучка в 24 ПП: а) в модернизированной системе, б) в существующей системе.

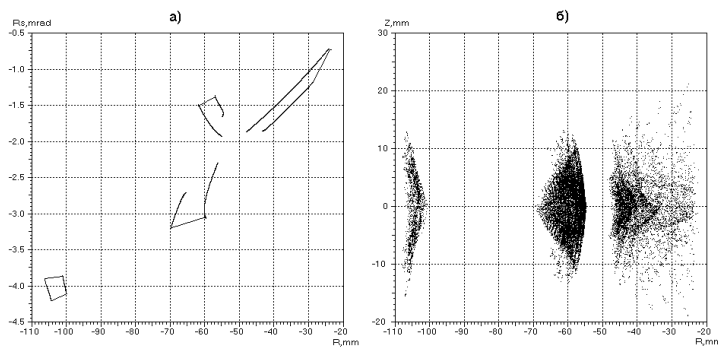


Рис. 3: Картина резонансной раскачки в 26 ПП: а) фазовая плоскость, б) поперечное сечение пучков.

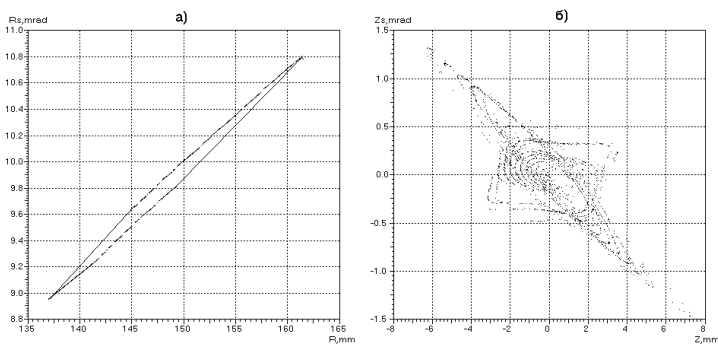


Рис. 4: Фазовые плоскости пучка в 30 ПП: а) радиальная, б) вертикальная.