

Допуски на пульсации токов питания магнитных элементов при медленном выводе пучка из Нуклотрона

О.С. Козлов, В.А. Михайлов, И.Б. Иссинский

*Лаборатория высоких энергий, Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия*

Введение

Пульсации токов питания структурных дипольных и квадрупольных магнитов, а также квадруполь системы наведения на резонанс приводят к пульсациям частот бетатронных колебаний. Пульсации токов питания секступольных линз возбуждения резонанса и коррекции хроматичности вызывают пульсации ширины резонансной полосы. Все эти пульсации приводят к изменению скорости наведения на резонанс и модуляции плотности выводимого пучка в течение времени вывода.

Частотные пульсации интенсивности выведенного пучка можно разделить на две части:

1) высокочастотная часть, захватывающая область, соответствующую частотам обращения частиц в ускорителе (от сотен КГц до нескольких МГц) и до величин в несколько ГГц, связанным с взаимодействием пучка с проводящей вакуумной камерой;

2) низкочастотная часть, занимающая область от 0 до нескольких КГц и главным образом характеризующаяся частотой 50 Гц и ее гармониками вплоть до 600 Гц.

Положительным свойством резонанса третьего порядка является его инерционность и слабая чувствительность к быстрым пульсациям частоты бетатронных колебаний. Основываясь на опыте работы систем медленного вывода на других ускорителях (например, У-70 [1]), можно заключить, что для Нуклотрона верхняя граница области частот, влияющих на выводимый пучок, будет порядка 10 кГц. Нижняя граница этой области равна ~ 10 Гц, так как пульсации с меньшими частотами могут быть эффективно подавлены с помощью системы обратной связи по току выведенного пучка.

Низкочастотный коэффициент однородности тока выведенного пучка можно определить как отношение квадратов среднего и среднеквадратического токов [2]:

$$F = \frac{\left(\int_0^{T_s} S(t) dt\right)^2}{T_s \int_0^{T_s} S(t)^2 dt}, \quad (1)$$

где T_s — время вывода; $S(t)$ — интенсивность выведенного пучка.

Медленный вывод на резонансе $3Q_x = 20$ осуществляется путем смещения частоты бетатронных колебаний частиц в полосе резонанса. Интенсивность выведенного пучка как функцию времени можно представить в виде

$$S(t) = \frac{dN}{dt} = \frac{dN}{dQ} \frac{dQ}{dt} = \frac{dN}{dQ} \dot{Q}_0 \left(1 + \frac{\dot{Q}_n}{\dot{Q}_0}\right), \quad (2)$$

где N — число частиц; dN/dQ — распределение плотности пучка по частотам бетатронных колебаний; $\dot{Q} = dQ/dt$ — скорость изменения частоты в процессе вывода; \dot{Q}_0 — средняя скорость движения по направлению к резонансу; \dot{Q}_n — переменная скорость движения, обусловленная пульсациями токов магнитных элементов. Используя уравнение (2), коэффициент однородности тока выведенного пучка (1) можно представить в виде

$$F = \frac{1}{1 + (\dot{Q}_n/\dot{Q}_0)^2/2}, \quad \dot{Q}_n \leq \dot{Q}_0. \quad (3)$$

Для расчета допусков на пульсации токов питания магнитных элементов будем исходить из наиболее опасного случая, когда гармонические колебания с частотой $\omega = 2\pi f$ могут сложиться при совпадении фаз колебаний в разных системах. Тогда при заданном коэффициенте однородности тока выведенного пучка суммарный допуск на пульсации можно представить в виде

$$\sum_i \dot{Q}_{n,i} \leq \sqrt{2 \left(\frac{1}{F} - 1 \right)} \cdot \dot{Q}_0. \quad (4)$$

1. Допуски на пульсации токов

Проведем оценки допусков на пульсации источников питания для максимальной энергии медленного вывода 6 ГэВ/нуклон, времени вывода $T_v = 1$ сек, импульсного разброса $\Delta p/p = \pm 1 \cdot 10^{-3}$ и эмиттанса циркулирующего пучка $\varepsilon = 2\pi$ мм·мрад. При этом полный диапазон резонансной расстройки в процессе вывода составит $\Delta Q_0 = 0.016$ и, соответственно, скорость движения в резонансе $\dot{Q}_0 = 0.016$ сек $^{-1}$. Тогда суммарный допуск на пульсации (4) при коэффициенте однородности тока выведенного пучка $F = 0.95$ не должен превышать величины $5.2 \cdot 10^{-3}$ сек $^{-1}$.

1. При ненулевой хроматичности кольца ускорителя Q' относительное изменение тока питания дипольных магнитов вызывает сдвиг бетатронной частоты:

$$\Delta Q_{n,m} = -Q' \Delta I / I. \quad (5)$$

Тогда скорость изменения частоты можно записать в виде

$$\Delta \dot{Q}_{n,m} = -(Q' / I) d(I_\omega \sin(\omega t)) / dt = Q' (I_\omega / I) \cos(\omega t) \omega, \quad (6)$$

$$(\Delta \dot{Q}_{n,m})_{макс} = Q' (I_\omega / I) \omega. \quad (7)$$

Для допустимой модуляции скорости наведения бетатронной частоты на резонанс 2% ($(\Delta \dot{Q}_{n,m})_{max} = \delta \dot{Q}_0$, $\delta = 0.02$) и натуральной хроматичности ускорителя $Q' \simeq -7$ получаем условие для дипольных магнитов:

$$\left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{n,m} = \frac{\delta \dot{Q}_0}{Q' \omega} = \frac{7 \cdot 10^{-6}}{f}. \quad (8)$$

2. Связь сдвига бетатронной частоты с изменением градиента магнитного поля в системе изменения частоты (Φ -линзы и квадруполи медленного вывода) можно записать в виде

$$\Delta Q = \frac{1}{4\pi} \oint \beta(s) \Delta k(s) ds = \frac{N \beta \Delta k l}{4\pi}, \quad (9)$$

где $\Delta k = (dB_y/dx)/B_0\rho = G/B_0\rho$; β, l, N — амплитудная функция Гвисса, эффективная длина квадрупольных линз, их количество. Тогда можно получить выражение для допуска на пульсации тока в системах управления бетатронной частотой:

$$\left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{n,k} = \frac{2\delta \dot{Q}_0}{N \beta k l f}. \quad (10)$$

Подставляя соответствующие численные значения [3] и $\delta = 0.02$, приходим к окончательным оценкам для Φ -линз и квадруполей системы медленного вывода соответственно ($G_{\Phi, макс} = 36$ Тл/м, $G_{к, макс} = 1$ Тл/м):

$$\left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{n,\Phi} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{f}, \quad \left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{n,\kappa} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{f}. \quad (11)$$

3. Пульсации в системах возбуждения резонансной гармоники и коррекции хроматичности приводят к пульсациям ширины резонансной полосы в процессе вывода. Расчетное значение ширины резонансной полосы можно определить по формуле

$$\Delta Q_p = 2\sqrt{\sqrt{3}\varepsilon A_p}, \quad (12)$$

где $|A_p| = 1/12\pi \oint \beta^{3/2} k' ds$ — амплитуда резонансной гармоники; $k' = (d^2 B_y / dx^2) / B_0 \rho = G' / B_0 \rho$ — сила секступоля. Пульсации тока питания секступольных линз ($\dot{A}_p \sim I_\omega \omega$) приведут к колебаниям ширины резонансной полосы $\Delta \dot{Q}_p$. При допуске на модуляцию полосы от каждой из систем 2% получим требования для источников питания секступорей медленного вывода и корректоров хроматичности ($G_c' = 3$ (Тл/м²А) I, $G_x' = 0.28$ (Тл/м²А) I, $I_{макс} = 100$ А):

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{n,c} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{f}, \quad \left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{n,x} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{f}. \quad (13)$$

В табл. 1 приведены численные значения допусков на пульсации токов питания магнитных элементов при медленном выводе пучка из Нуклотрона.

Таблица 1: Допуски на пульсации тока ($\Delta I/I$) в различных системах ускорителя при медленном выводе.

f, Гц	10	50	100	150	300	600
Диполи, 10^{-8}	70	14	7	4.6	2.3	1.2
Квадруполи, 10^{-8}	50	10	5	3.3	1.6	0.8
Квадруполи МВ, 10^{-6}	200	40	20	13	6.6	3.3
Секступоли МВ, 10^{-7}	200	40	20	13	6.6	3.3
Корр. хром., 10^{-6}	100	20	10	6.5	3.3	1.6

Закключение

Основным методом улучшения временной структуры пучка при медленном выводе является подавление паразитных пульсаций токов питания магнитных элементов ускорителя. Как видно из проведенного анализа, условие получения хорошей однородности выведенного пучка накладывает жесткие допуски на пульсации токов в некоторых системах ускорителя, особенно для структурных дипольных и квадрупольных магнитов. Введение системы обратной связи по току выведенного пучка позволит подавить низкочастотную часть спектра до ~ 10 Гц. Пульсации в диапазоне 50–600 Гц могут быть эффективно подавлены при использовании ВЧ-шума [4], [5] или путем пересечения пучком ВЧ-сепаратрис в полосе резонанса [2]. Оба этих метода используют тот факт, что низкое значение модуляции интенсивности выведенного пучка можно достигнуть локальным уменьшением плотности частиц на границе резонанса и увеличением скорости наведения пучка (см. (2), (3)).

Список литературы

- [1] Федотов Ю.С. Исследование динамики пучка протонов при медленном выводе из ускорителя ИФВЭ на энергию 70 ГэВ. Диссертация ИФВЭ, Серпухов, 1980.
- [2] R. Capii, Ch. Steinbach. Low frequency duty factor improvement for the CERN PS slow extraction using RF phase displacement technique. IEEE Transactions on nuclear science, Vol. NS-28, No. 3.
- [3] I.B. Issinsky et al. Nuclotron lattice, Proc. of EPAC90, Nice, 1990, vol. 1, p. 458.
- [4] S. Van der Meer. Stochastic extraction - a low ripple version of resonant extraction, CERN/PS/AA/78-6, 1978.
- [5] W. Hardt. Ultraslow extraction out of LEAR, CERN/PS/DL/LEAR Note 81-6.