

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ КВАДРУПОЛЬНЫХ ЛИНЗ НУКЛОТРОНА

*А. В. Филиппов^{a, 1}, Е. В. Горбачёв^a, В. Л. Смирнов^a,
А. В. Тузиков^a*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Рассматривается алгоритм, который по экспериментально измеренным положениям пучка в пучковой камере синхротрона позволяет сделать оценку геометрических смещений квадрупольных линз от их идеального положения в кольце.

С помощью предложенного алгоритма по измеренным в ПНР-IV положениям пучка ядер ксенона-124 в пучковой камере нуклотрона на энергиях инжекции и вывода проведена оценка геометрических смещений квадрупольных линз нуклотрона.

An algorithm that allows us to estimate the geometric displacements of quadrupole lenses from their ideal position in the synchrotron accelerator based on experimentally measured beam positions in vacuum chamber is presented.

By using the proposed algorithm, the geometric displacements of the Nuclotron quadrupole lenses were estimated based on the measured xenon-124 nuclei beam positions in Nuclotron vacuum chamber at injection and extraction energies during Run IV.

PACS: 41.85.Lc; 29.20.-c

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

- Разработать алгоритм, который позволит по экспериментальным данным положения пучка в пучковой камере синхротрона сделать оценку геометрических смещений квадрупольных линз от их идеального положения в кольце ускорителя.

- Используя полученные в ходе ПНР-IV с помощью пикапов экспериментальные данные положения пучка ядер ксенона-124 на энергии инжекции 205 МэВ/нуклон (магнитное поле около 0,23 Тл) в нуклотрон из бустера и энергии вывода 3,9 ГэВ/нуклон (магнитное поле около 1,69 Тл) из нуклотрона в корп. 205, провести оценку геометрического смещения расставленных по кольцу нуклотрона квадрупольных линз [1, 2] от их идеального положения.

¹E-mail: philippov@jinr.ru

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ КВАДРУПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ В СИНХРОТРОНЕ

Пусть в горизонтальном направлении оси квадрупольных линз имеют смещения Δx_q , где q — номер линзы в магнитной структуре ускорителя. Будем считать, что среднее значение μ и среднеквадратичный (СК) разброс σ смещений квадрупольных линз близки к среднему и СК разбросу, описывающему смещения квадрупольных линз к параметрам предполагаемого нормального распределения, т. е. $N(\mu, \sigma) \approx N(\overline{\Delta x}, \sigma_{\overline{\Delta x}})$.

Пусть имеются возмущения замкнутой орбиты (ЗО) в ускорителе, вызванные заданием ведущего магнитного поля B_0 и смещением квадрупольных линз в кольце ускорителя. Тогда результирующая горизонтальная ЗО, обозначенная здесь как $x_{\Delta B/B_0 + \overline{\Delta x} + \sigma_{\overline{\Delta x}}} = x_{\Delta B/B_0 + \overline{\Delta x} + \sigma_{\overline{\Delta x}}}(s)$, в линейном приближении будет равна сумме орбит:

$$x_{\Delta B/B_0 + \overline{\Delta x} + \sigma_{\overline{\Delta x}}}(s) = x_{\Delta B/B_0}(s) + x_{\overline{\Delta x}}(s) + x_{\sigma_{\overline{\Delta x}}}(s). \quad (1)$$

Здесь s — продольная координата в ускорителе.

Дисперсионный член $x_{\Delta B/B_0} = x_{\Delta B/B_0}(s)$ в (1), связанный с неточностью задания ведущего магнитного поля, имеет вид

$$x_{\Delta B/B_0}(s) = \frac{\Delta B}{B_0} D_x(s). \quad (2)$$

Здесь $\Delta B = B - B_0$, где B — магнитное поле, при котором проведено измерение орбиты, B_0 — согласованное с продольным импульсом пучка ведущее магнитное поле.

В выражении (1) член $x_{\overline{\Delta x}} = x_{\overline{\Delta x}}(s)$, связанный со средним смещением квадрупольных линз, может быть представлен в виде

$$x_{\overline{\Delta x}}(s) = (k D_x(s) + 1) \overline{\Delta x}. \quad (3)$$

Здесь k — коэффициент пропорциональности.

В выражении (1) последний член $x_{\sigma_{\overline{\Delta x}}} = x_{\sigma_{\overline{\Delta x}}}(s)$ связан со случайным смещением квадрупольных линз в кольце ускорителя, распределенным по нормальному закону с нулевым средним $N(0, \sigma)$, и может быть записан в виде

$$x_{\sigma_{\overline{\Delta x}}}(s) = F(s, \sigma_{\overline{\Delta x}}). \quad (4)$$

Здесь функция $F(s, \sigma_{\overline{\Delta x}})$ определяет искажение орбиты для случайной выборки смещений квадрупольных линз ускорителя.

Пусть набором пикап-электродов (ПЭ) ускорителя вблизи предполагаемого ведущего магнитного поля B_0 производятся два последовательных изменения орбиты в горизонтальной плоскости:

$$x_1 = x_{\Delta B_{10}/B_0 + \overline{\Delta x} + \sigma_{\overline{\Delta x}}} \quad \text{и} \quad x_2 = x_{\Delta B_{20}/B_0 + \overline{\Delta x} + \sigma_{\overline{\Delta x}}},$$

где $\Delta B_{10} = B_1 - B_0$ и $\Delta B_{20} = B_2 - B_0$. Предполагаем, что величина $\Delta B = B_2 - B_1$ между двумя последовательно заданными величинами магнитного поля B_1 и B_2 нам известна. Для определенности считаем $B_2 > B_1$. В зависимости от величины ведущего магнитного поля B_0 разность ΔB может быть более 10 Гс, но такая, что $\Delta B \ll B_0$.

С учетом (1) усредненная по всем ПЭ разность между двумя последовательно измеренными орбитами определяется как

$$\begin{aligned} |\overline{x_2 - x_1}| &= |\overline{x_2} - \overline{x_1}| = \\ &= \overline{x_{\Delta B_{20}/B_0}} - \overline{x_{\Delta B_{10}/B_0}} = \frac{\Delta B_{20}}{B_0} \overline{D_{x,2}} - \frac{\Delta B_{10}}{B_0} \overline{D_{x,1}} = \frac{\Delta B}{B_0} \overline{D_x}. \end{aligned} \quad (5)$$

Связанные со смещением квадрупольных линз члены в (1) сократились в (5), оптика ускорителя одинакова в двух разных измерениях орбиты, поэтому в местах расположения ПЭ справедливо соотношение $\overline{D_{x,1}} = \overline{D_{x,2}} = \overline{D_x}$.

Из (5) получаем выражение для определения согласованного с продольным импульсом пучка ведущего магнитного поля B_0 , а именно

$$B_0 = \left| \frac{\overline{D_x}}{\overline{x_2} - \overline{x_1}} \right| \Delta B. \quad (6)$$

Все величины в (6) нам известны: $\overline{x_1}$ и $\overline{x_2}$ — из измерений, дисперсия $\overline{D_x}$ может быть измерена или взята из математической модели магнитной структуры ускорителя.

Пусть теперь у нас имеется какая-то измеренная орбита $x_1 = x_1(s)$ по типу (1), тогда величина $x_1 - x_{\Delta B/B_0}$ определит орбиту $x_2 = x_2(s)$, вызванную лишь смещением квадрупольных линз ускорителя, с учетом (1) равную

$$x_2(s) = x_1(s) - x_{\Delta B/B_0}(s) = x_1(s) - \frac{\Delta B}{B_0} D_x(s) = x_{\overline{\Delta x}}(s) + x_{\sigma_{\overline{\Delta x}}}(s). \quad (7)$$

В выражении (7) $\Delta B = B - B_0$, где B — магнитное поле, при котором проведено измерение орбиты x_1 , а согласованная с продольным импульсом пучка величина ведущего магнитного поля B_0 нам известна и определяется из (6). Усредняя (7) по ПЭ орбиту x_2 , получим

$$\begin{aligned} \overline{x_2} &= \overline{x_1 - x_{\Delta B/B_0}} = \overline{x_{\overline{\Delta x}}} + \overline{x_{\sigma_{\overline{\Delta x}}}} = \overline{(kD_x(s) + 1)\overline{\Delta x} + F(s, \sigma_{\overline{\Delta x}})} = \\ &= (k\overline{D_x} + 1)\overline{\Delta x} + \overline{F(\sigma_{\overline{\Delta x}})}. \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрим три случая. Первый случай: пусть в (8)

$$(k\overline{D_x} + 1)\overline{\Delta x} \gg \overline{F(\sigma_{\overline{\Delta x}})}. \quad (9)$$

Тогда в выражении (7) вторым членом можно пренебречь, и в этом случае среднее смещение квадрупольных линз с учетом (8) определяется как

$$\overline{\Delta x} = \frac{\overline{x_2}}{k\overline{D_x} + 1}. \quad (10)$$

Два других случая:

$$(k\overline{D_x} + 1)\overline{\Delta x} \ll \overline{F(\sigma_{\overline{\Delta x}})} \quad (11)$$

и

$$(k\overline{D_x} + 1)\overline{\Delta x} \approx \overline{F(\sigma_{\overline{\Delta x}})} \quad (12)$$

требуют специального исследования, которое можно сделать с помощью моделирования огибающих 3О пучка в программе MAD-X [3] с использованием математической модели ускорителя.

Таким образом, описанный выше алгоритм позволяет сделать оценку смещений квадрупольных линз в ускорителе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ИЗМЕРЕННЫХ ОРБИТ ПУЧКА В НУКЛОТРОНЕ

В рамках ПНР-IV в нуклотроне осуществлялось измерение горизонтальных орбит пучка на энергии инжекции и вывода. Измерения орбиты пучка в нуклотроне на энергии инжекции проводились при включенных корректирующих магнитах системы коррекции орбиты пучка, поскольку на энергии инжекции в нуклотроне не было устойчивой циркуляции пучка без включенной системы коррекции. На выводе система коррекции также была включена.

Измерения орбиты проводились с помощью 24 мониторов положения пучка, расположенных по кольцу нуклотрона (рис. 1): 18 — возле дефокусирующих линз (Д-линз), 6 — возле фокусирующих линз (Ф-линз). Причем 3 пикапа расположены в местах, где имеется большая и положительная горизонтальная дисперсия ($D_x > 3,9$ м), 8 — где имеется отрицательная горизонтальная дисперсия ($-1,6 < D_x < -1,2$ м), остальные 13 пикапов — в местах, где горизонтальная дисперсия имеет величину вблизи нуля ($0,5 < D_x < 0,7$ м).

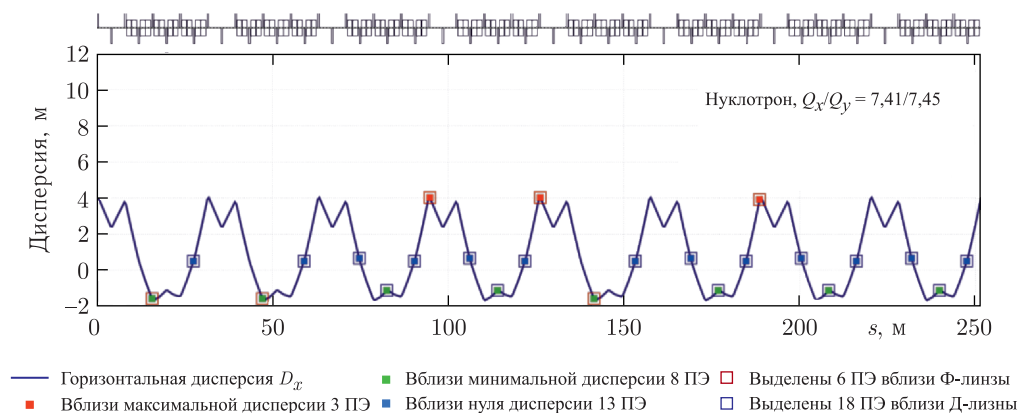


Рис. 1. Дисперсия и схематичное расположение ПЭ в кольце нуклотрона

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НУКЛОТРОНА

Все расчеты, приведенные ниже, сделаны на основе разработанной математической модели нуклотрона для рабочей точки $Q_x/Q_y = 7,41/7,45$ [1, 2]. Разработанная математическая модель нуклотрона учитывает:

— расстановку дипольных магнитов в кольце, «холодные» магнитные измерения (МИ) нелинейностей магнитных полей дипольных магнитов [4];

— расстановку квадрупольных магнитов в кольце, «теплые» МИ нелинейностей магнитных полей квадрупольных магнитов (фрагментарные).

Упомянутые фрагментарные данные «теплых» МИ нелинейностей магнитного поля квадрупольных магнитов были использованы для построения эмпирического распределения [5] — естественного приближения функции распределения случайной величины (каждой из гармоник), построенного по ее выборке. Далее найденное эмпирическое распределение использовалось для построения полного набора нелинейностей магнитных полей квадрупольных магнитов, установленных в кольце нуклотрона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Используя набор измеренных данных для структуры нуклотрона, с помощью программы MAD-X [3] мы можем восстановить одну из возможных ЗО пучка. При восстановлении орбиты будем предполагать, что каждая из квадрупольных линз нуклотрона смещена на какое-то свое значение — Δx_q , где q — номер линзы в структуре нуклотрона. Подбирая Δx_q , мы можем найти ЗО, проходящую через измеренные точки $x_{пэ, p}$, здесь p — номер пикапа. Дополнительным условием при восстановлении ЗО

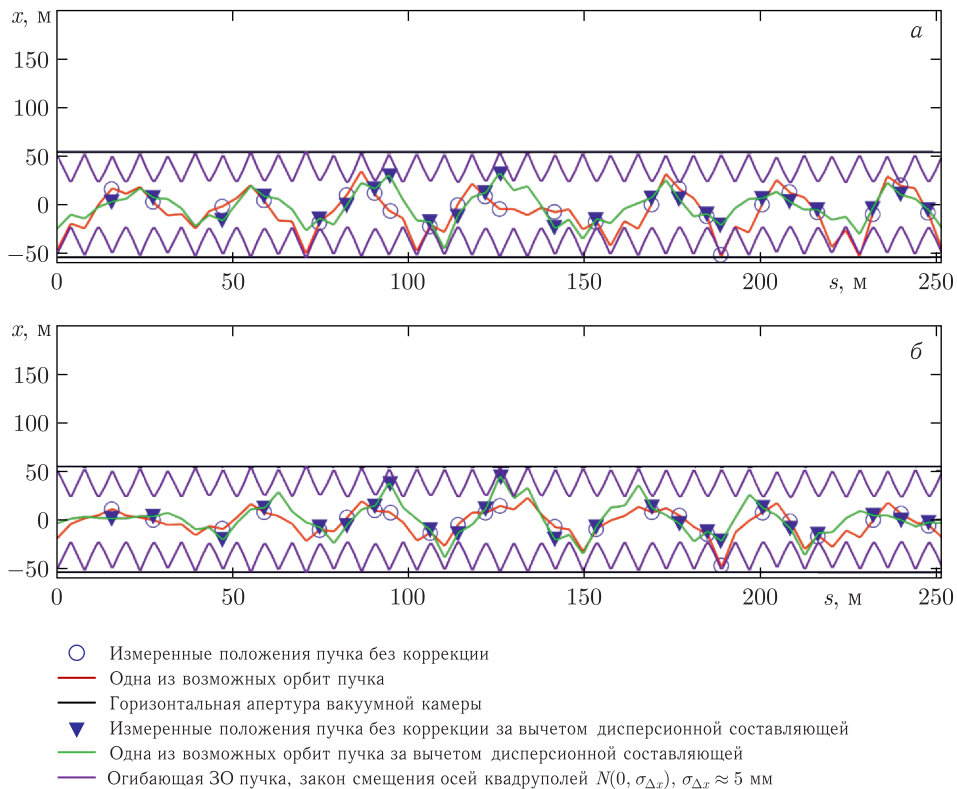


Рис. 2. Нуклотрон $Q_x/Q_y = 7,41/7,45$, пучок $^{124}\text{Xe}^{54+}$ при а) 205 МэВ/нуклон; б) 3,9 ГэВ/нуклон

будет условие $|x_p| \leq a_x$, орбита не должна превышать значения апертуры вакуумной камеры по горизонтали. Здесь $a_x = 55$ мм — горизонтальная полуось вакуумной камеры. Всего в структуре нуклотрона 64 квадрупольные линзы и 24 пикапа, т. е. $q = \overline{1,64}$, $p = \overline{1,24}$.

Таким образом, принимая во внимание дополнительное условие (ЗО находится внутри пучковой камеры), мы имеем переопределенную задачу, в которой возможно выделить необходимые и достаточные условия для ее решения. Эту задачу мы решаем с помощью программы MAD-X [3].

На рис. 2 показано измеренное горизонтальное положение пучка на пикапах нуклотрона $x_{пэ}$ и восстановленные по этим данным ЗО на энергии инжекции и вывода соответственно, приведены огибающие замкнутых орбит пучка, вычисленные путем решения с помощью MAD-X [3] сформулированной выше задачи.

Таким образом, можно заключить, что измеренные горизонтальные точки $x_{пэ}$ распределены по нормальному закону с нулевым средним и СК разбросом отклонений 4 мм на инжекции и 5 мм на выводе. Видно, что полученные оценки близки, они и определяют возможное смещение квадрупольных линз в нуклотроне.

Предлагаемый алгоритм может быть использован в будущих сеансах на бустере и нуклотроне.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Г. Г. Ходжибагияну за предоставленные из архива таблицы расстановки дипольных магнитов и квадрупольных линз в кольце нуклотрона, А. М. Донягину за предоставленные данные магнитных измерений дипольных магнитов и квадрупольных магнитов нуклотрона и объяснение проведенных измерений, а также другую информацию, существенную для созданной математической модели нуклотрона. Кроме того, авторы выражают благодарность В. А. Лебедеву, И. Н. Мешкову за проявленный интерес к работе, А. О. Сидорину и А. В. Бутенко за полезные обсуждения результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иссинский И. Б., Бровко О. И., Бутенко А. В. Эксперименты по исследованию потерь интенсивности пучка нуклотрона (2002–2005 гг.). Сообщ. ОИЯИ Р9-2007-107. Дубна, 2007. 15 с.
2. Смирнов А. А. Нуклотрон — новая технология сверхпроводящей магнитной системы синхротрона // ЭЧАЯ. 2001. Т. 32, вып. 1. С. 96–142.
3. <http://madx.web.cern.ch/madx/>
4. Донягин А. М., Коваленко А. Д., Козлов О. С., Михайлов В. А., Смирнов А. А. Анализ результатов магнитных измерений дипольных и квадрупольных магнитов нуклотрона. Сообщ. ОИЯИ Р9-94-329. Дубна, 1994.
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Empirical_distribution_function

Получено 28 октября 2024 г.