

# ДИАГНОСТИКА ПУЧКОМ ПОПЕРЕЧНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МАКРОСТРУКТУРЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ЧАСТИ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ИОНОВ

*В.А. Моисеев*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт ядерных исследований Российской академии наук” (ИЯИ РАН), Москва*

*E-mail: moiseev@inr.ru*

В стандартном варианте высокоэнергетичная часть линейных ускорителей ионов с небольшой массой, например протонов или отрицательных ионов водорода, имеет формулу построения структуры: ускоряющая часть без специальной поперечной фокусировки и размещенные между ними квадрупольные линзы, обеспечивающие стабильную поперечную динамику. Значительное количество элементов такой структуры размещается на отдельных механических балках. Предлагается метод, который позволяет применить ускоряемый пучок ионов для определения параметров поперечного геометрического несогласования соседних балок на исследуемом участке. При этом считается, что геометрия размещения элементов ускорителя на каждой балке идеальна. Для реализации предлагаемого метода используются измерения положения центра тяжести пучка ионов в конце исследуемого участка при последовательных возмущениях фокусирующих элементов, размещенных на каждой балке.

## ВВЕДЕНИЕ

Структура высокоэнергетической части линейных ускорителей ионов, как правило, состоит из отдельных частей для ускорения и формирования поперечной динамики пучка. Значительная часть ускоряюще-фокусирующих элементов объединяется в макроструктурные группы, которые размещаются на длинных прочных балках. В этом случае для каждой макроструктурной группы не трудно выполнить качественную геодезию электрофизического оборудования на начальном этапе. Предполагаем, что элементы на отдельной балке размещены идеально и их положение неизменно со временем. Однако по какой-либо причине со временем могут значительно измениться параметры поперечного геометрического несогласования соседних балок на исследуемом участке. Особенно данный процесс может иметь место на начальном этапе эксплуатации ускорителя. В результате он приводит к когерентному влиянию ускоряюще-фокусирующей структуры внутри каждой балки главным образом на динамику центра тяжести пучка. Основное воздействие происходит при переходах между балками, имеющими в горизонтальной и вертикальной плоскостях как линейные сдвиги, так и наличие не проектных углов наклона между осями соседних балок. Действие данных возмущений поперечного геомет-

рического несогласования балок имеет продольные размеры, сравнимые с длиной периода поперечных колебаний частиц в структуре ускорителя. Далее изучается влияние погрешностей относительного поперечного геометрического несогласования между соседними балками на динамику центра тяжести пучка на исследуемом участке. Приведенное математическое описание моделирования данного процесса, а также предложенные экспериментальные методы позволяют оценить относительную погрешность поперечного геометрического несогласования соседних балок.

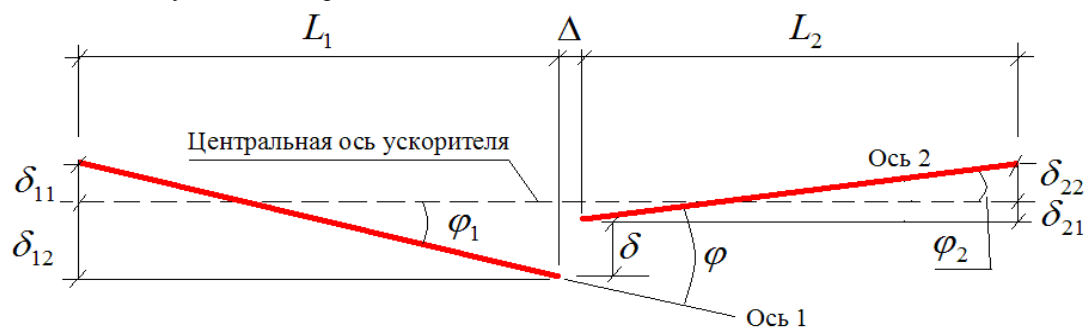
В дальнейшем будем рассматривать динамику центра тяжести пучка только в одной плоскости, полагая, что поперечные движения независимы, т.е. предлагаемые алгоритмы применяются идентично для обеих поперечных плоскостей.

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

На рисунке приведены характерные параметры поперечного геометрического несогласования двух соседних участков макроструктуры ускорителя, на каждом из которых размещено значительное количество ускоряюще-фокусирующих элементов.

На данном рисунке применены следующие обозначения:

$L_1, L_2$  – продольные размеры двух соседних балок.



*Характерные параметры двух соседних элементов макроструктуры ускорителя*

Учитывая неравенства, приведенные далее, данные параметры можно рассматривать как длины балок;

$\Delta \lll (L_1, L_2)$  – продольное расстояние между концом первой балки и началом второй;

$\delta_{11} \lll L_1, \delta_{21} \lll L_2$  – сдвиги передних концов балок относительно центральной оси ускорителя. Положительное значение полагается, если они расположены выше оси и наоборот;

$\delta_{12} \lll L_1, \delta_{22} \lll L_2$  – сдвиги задних концов балок относительно центральной оси ускорителя. Положительное значение полагается, если они расположены выше оси и наоборот;

$\varphi_1 \approx (\delta_{12} - \delta_{11})/L_1$  – угол наклона оси первой балки относительно центральной оси ускорителя.

Знак определяется по знакам и абсолютным значениям смещений концов балки. Он положительный, если ось балки направлена в положительном поперечном направлении от оси ускорителя. Направление продольной оси ускорителя – по ходу движения пучка;

$\varphi_2 \approx (\delta_{22} - \delta_{21})/L_2$  – угол наклона оси второй балки относительно центральной оси ускорителя. Знак выбирается аналогично предыдущему определению для  $\varphi_1$ .

Для дальнейших расчетов важны только следующие относительные параметры:

$\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$  – относительный угол между осью второй балки (ось 2) и первой (ось 1). Знак определяется данной формулой и соотношениями для  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , приведенными ранее. Он положителен, если ось 2 направлена относительно оси 1 в положительном поперечном направлении от оси ускорителя (см. рисунок);

$\delta = (\delta_{21} - \delta_{12})$  – относительное геометрическое смещение между входом второй балки и выходом первой. Знак определяется данной формулой. Он положителен, если вход второй балки лежит в положительном поперечном направлении от оси первой балки (см. рисунок).

Учитывая малость величины  $\Delta$  по сравнению с  $L_1$ , она включается в  $L_1$  при дальнейшем моделировании без какого-либо существенного влияния на конечные результаты.

Если предположить независимость смещений  $\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{21}, \delta_{22}$ , а также равнозначность диапазонов изменений каждого из данных параметров:

$$|\delta_{11}| \leq \delta_m, |\delta_{12}| \leq \delta_m, |\delta_{21}| \leq \delta_m, |\delta_{22}| \leq \delta_m, \text{ согласно приведенным ранее определениям диапазоны изменения основных параметров для каждой балки можно представить в виде:}$$

$$\delta \in [-2\delta_m; 2\delta_m]; \quad (1)$$

$$\varphi \in \left[ -\left( \frac{2\delta_m}{L_1} + \frac{2\delta_m}{L_2} \right); \left( \frac{2\delta_m}{L_1} + \frac{2\delta_m}{L_2} \right) \right] \approx \left[ -\frac{4\delta_m}{L_a}; \frac{4\delta_m}{L_a} \right].$$

В (1) сделано предположение, что все балки имеют примерно одинаковую длину  $L_a$ .

В дальнейшем полагаем, что для выполнения расчетов и проведения измерений справедливы следующие положения:

- исследуемый участок содержит не слишком большое число балок ( $\sim 10$ ). С увеличением числа балок уменьшается точность расчетов и снижается качество проводимых измерений;
- на последней балке находится как минимум один профилометр для проведения измерений положения центра тяжести пучка в двух поперечных фазовых плоскостях. Желательно иметь более одного профилометра, размещенных ближе к концу последней балки;
- на каждой балке существует регулирующий элемент, влияющий на динамику центра пучка в двух поперечных плоскостях;
- на исследуемом участке для огибающей пучка выполняется условие адиабатичности ее поведения.

Последний пункт связан с возможностью стандартного разделения поведения огибающей пучка и динамики его центра тяжести без существенного влияния друг на друга. Условия адиабатичности на каждом квазипериоде (расстояние между центрами соседних, фокусирующих в поперечной плоскости, элементов структуры ускорителя) для поперечных колебаний огибающей пучка можно оценить следующим образом:

$$\frac{|G_1 - G_2|}{G_1} \lll \frac{\mu_{12}}{360^\circ}, \quad (2)$$

где  $G_1, G_2$  – градиенты магнитного поля в двух соседних фокусирующих элементах;  $\mu_{12}$  – набег фазы поперечных колебаний частиц пучка в выбранном поперечном направлении на квазипериоде. В современных ускорителях  $\mu_{12} \sim (65...70)^\circ$ .

В этом случае неравенство (2) можно оценить как

$$\frac{|G_1 - G_2|}{G_1} < \left( \sim \frac{1}{100} \right) \Rightarrow |G_1 - G_2| \sim 0,125 \text{ Т/м.}$$

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФОРМАЛИЗМ

Предполагаем, что первая балка является базовой.

В общем случае центр тяжести пучка в выбранной поперечной плоскости на последнем профилометре в конце исследуемого участка будет иметь фазовые координаты  $(x_1, x_1')^T$ :

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} = M_N^* \left( M_{N-1} \dots \left( M_2 \left( M_1 \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \delta_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} \right) - \begin{pmatrix} \delta_3 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} \right) \dots \right. \\ \left. \dots - \begin{pmatrix} \delta_N \\ \varphi_N \end{pmatrix} \right), \quad (3)$$

где  $(x_0, x_0')^T$  – фазовые координаты центра тяжести пучка на входе первой балки;

$i \in [1, N]$  – номер балки;

$N$  – полное количество балок на исследуемом участке;

$(\delta_i, \varphi_i)^T$   $i = [2...N]$  – параметры, приведенные на рисунке, для балок с номерами  $(i-1)$  и  $(i)$ , являются неизвестными;

$M_i$  –  $(2 \times 2)$ -матрица передачи в выбранной поперечной плоскости элементов структуры ускорителя, размещенных на  $i$ -й балке. Отметим, что все матрицы определены геометрией размещения элементов структуры ускорителя на балке и эксплуатационными параметрами;

$M_N^*$  – матрица передачи на последней балке от ее входа до последнего измеряющего профилометра.

Структура построения (3) достаточно проста:

$M_1(x_0, x'_0)^T$  – транспортировка центра тяжести пучка  $(x_0, x'_0)^T$  от входа первой балки к ее концу;

$(\delta_2, \varphi_2)^T$  – переход в систему фазовых координат второй балки.

Данный процесс повторяется последовательно до перехода  $(\delta_N, \varphi_N)^T$  в систему фазовых координат последней балки и транспортировки  $M_N^*$  центра тяжести пучка до последнего профилометра.

Раскрыв скобки, уравнение (3) можно представить в более удобном виде:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} = M_N^* M_{N-1} \dots M_2 M_1 \begin{pmatrix} x_0 \\ x'_0 \end{pmatrix} - \quad (4)$$

$$- M_N^* M_{N-1} \dots M_2 \begin{pmatrix} \delta_2 \\ \varphi_2 \end{pmatrix} - M_N^* M_{N-1} \dots M_3 \begin{pmatrix} \delta_3 \\ \varphi_3 \end{pmatrix} - \dots$$

$$- M_N^* M_{N-1} \begin{pmatrix} \delta_{N-1} \\ \varphi_{N-1} \end{pmatrix} - M_N^* \begin{pmatrix} \delta_N \\ \varphi_N \end{pmatrix}.$$

Очевидно, что представление (4) показывает, что поперечное геометрическое несогласование  $(\delta_i, \varphi_i)^T$  соседних балок с номерами  $(i-1)$  и  $(i)$  влияет на измерения центра тяжести пучка на последнем профилометре только через “чистые” матрицы передачи  $M_i$  балок  $i = [i...N]$ , следующих за данным несогласованием. При этом никакие несогласования и матрицы передачи балок до возмущения  $(\delta_i, \varphi_i)^T$  на его действие не вкладывают в измерения центра тяжести пучка на последнем профилометре не оказывают влияния.

Для нахождения неизвестных

$$(x_0, x'_0, \delta_2, \dots, \delta_N, \varphi_2, \dots, \varphi_N)$$

выполняется ряд измерений фазовых координат центра тяжести пучка на последнем профилометре размещенном на  $N$ -й балке. Отметим, что для этих измерений возможно использование как одного профилометра, но при увеличенном числе измерений, так и более одного, но с меньшим числом измерений.

Последовательность измерений и вычислений предлагается провести по следующей методике:

- базовое измерение фазовых координат центра тяжести пучка  $(x_1, x'_1)^T$  для номинальных значений

токов электромагнитного оборудования всего исследуемого участка. Отклонением в разумных пределах градиентов в фокусирующих элементах на первой балке изменим матрицу передачи  $M_1$ . Проводим новые измерения фазовых координат центра тяжести пучка  $(x_1, x'_1)^T$ . Вычитая параметры и результаты двух измерений с учетом (4), получим следующую систему линейных уравнений:

$$\Delta \bar{x}_1 = M_N^* M_{N-1} \dots M_2 (\Delta M_1) \bar{x}_0, \quad (5)$$

где  $\bar{x}_0 = (x_0, x'_0)^T$ ;  $\Delta \bar{x}_1 = (x_1, x'_1)^T_b - (x_1, x'_1)^T_d$ ;  $\Delta M_1$  – разница в матрицах передачи элементов на первой балке для двух проведенных измерений. Решением системы (5) получим значение неизвестных  $\bar{x}_0 = (x_0, x'_0)^T$ ;

- по аналогии с предыдущим пунктом, при возвращении параметров оборудования на первой балке к базовому значению, проведем дополнительное измерение фазовых координат центра тяжести пучка  $(x_1, x'_1)^T$  при изменении матрицы передачи  $M_2$  отклонением в разумных пределах градиентов в фокусирующих элементах на второй балке. Вычитая полученные результаты из базового решения и принимая во внимание расчет (5) для  $\bar{x}_0$  с учетом (4), получим систему уравнений

$$\Delta \bar{x}_1 = M_N^* M_{N-1} \dots (\Delta M_2) M_1 \bar{x}_0 - \quad (6)$$

$$- M_N^* M_{N-1} \dots (\Delta M_2) (\delta_2, \varphi_2)^T.$$

Решением системы линейных уравнений (6) находим неизвестные  $(\delta_2, \varphi_2)$ ;

- предположим, что аналогично предыдущему пункту определены неизвестные

$$(x_0, x'_0, \delta_2, \dots, \delta_i, \varphi_2, \dots, \varphi_i) \quad 2 \leq i < N.$$

Вернем параметры оборудования на  $i$ -й балке к базовому значению и проведем дополнительное измерение фазовых координат центра тяжести пучка  $(x_1, x'_1)^T$  при изменении матрицы передачи  $M_{i+1}$  отклонением в разумных пределах градиентов в фокусирующих элементах на  $(i+1)$ -й балке. Вычитая полученные результаты из базового решения с учетом (4), получим систему уравнений:

$$\Delta \bar{x}_1 = M_N^* M_{N-1} \dots (\Delta M_{i+1}) \dots M_1 \bar{x}_0 - \quad (7)$$

$$- M_N^* M_{N-1} \dots (\Delta M_{i+1}) \dots M_2 (\delta_2, \varphi_2)^T - \dots$$

$$\dots - M_N^* M_{N-1} \dots (\Delta M_{i+1}) M_i (\delta_i, \varphi_i)^T -$$

$$- M_N^* M_{N-1} \dots (\Delta M_{i+1}) (\delta_{i+1}, \varphi_{i+1})^T.$$

Решением системы линейных уравнений (7) находим неизвестные  $(\delta_{i+1}, \varphi_{i+1})$ ,  $2 \leq i < N$ .

Таким образом, данный алгоритм позволяет определить параметры поперечного геометрического несогласования соседних балок на всем исследуемом участке.

В зависимости от числа профилометров на последней балке возможно получить следующий минимум числа измерений профиля пучка:

- при использовании одного профилометра на последней балке процесс состоит из двух измерений для каждой конфигурации всего исследуемого сегмента ускорителя. При этом полагаем, что непосредственно перед профилометром существует участок, расположенный на той же балке, с регулируемой матрицей передачи  $M_{tr}$ . Первое измерение координаты центра тяжести пучка для данного эксперимента трансформируем в любую точку перед участком с регулируемой матрицей передач  $M_{tr}$ . Изменяем матрицу  $M_{tr}$  и получаем новые значения для координаты центра тяжести пучка на профилометре. Для данной измененной матрицы  $M_{tr}$  трансформируем первое полученное решение в расположение профилометра. В результате получим фазовые координаты центра тяжести пучка в исследуемой поперечной плоскости. В этом случае полное минимальное число измерений будет равно  $2 \cdot (N + 1)$ ;

- при использовании более одного профилометра на последней балке действия упрощаются. Измерения на первых профилометрах сразу трансформируются с помощью матриц передач между профилометрами в расположение последнего профилометра. В данном случае минимальное число измерений будет равно  $(N + 1)$ .

При наличии потерь частиц пучка во время экспериментов возможно увеличение реального числа измерений из-за применения определенных итерационных процедур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен математический алгоритм, который позволяет применить ускоряемый пучок ионов для определения поперечного геометрического несогласования элементов макроструктуры высокоэнергетической части линейных ускорителей. Показана возможная экспериментальная реализация данного алгоритма с использованием профилометров в конечной части исследуемого участка. Знание геометрических погрешностей поперечного геометрического несогласования элементов макроструктуры ускорителя дает возможность улучшить динамику центра тяжести пучка и тем самым сократить возможные потери его частиц.

*Article received 30.08.2013*

## BEAM DIAGNOSTIC OF TRANSVERSE GEOMETRIC MACROSTRUCTURE ERRORS FOR HIGH ENERGY PART OF LINEAR ION ACCELERATORS

*V.A. Moiseev*

The standard design of a high energy part of linear accelerators for the ions with small mass, for example for protons or negative hydrogen ions, has followed structure formula: the pure accelerator sections separated by quadrupoles for a stable transverse dynamics. A large number of the accelerator structure elements are placed on the separated mechanical supports. The method has been proposed to apply an accelerated ion beam for the determination of a transverse geometric mismatching for neighbour supports on the accelerator part under investigation. It was supposed that a geometric placement of elements on each support is ideal. For realization of proposed method the beam center measurements are used at the end of the accelerator part under investigation by sequential varying the focusing elements placed on every support.

## ДІАГНОСТИКА ПУЧКОМ ПОПЕРЕЧНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПОГРІШНОСТЕЙ МАКРОСТРУКТУРИ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЧАСТИНИ ЛІНІЙНИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ ІОНІВ

*V.A. Moiseev*

У стандартному варіанті високоенергетична частина лінійних прискорювачів іонів з невеликою масою, наприклад протонів або негативних іонів водню, має формулу побудови структури: прискорююча частина без спеціального поперечного фокусування і розміщені між ними квадрупольні лінзи, що забезпечують стабільну поперечну динаміку. Значна кількість елементів такої структури розміщується на окремих механічних балках. Пропонується метод, який дозволяє застосувати прискорюваний пучок іонів для визначення параметрів поперечного геометричного неузгодження сусідніх балок на досліджуваній ділянці. При цьому вважається, що геометрія розміщення елементів прискорювача на кожній балці ідеальна. Для реалізації пропонуваного методу використовуються виміри положення центра тяжіння пучка іонів у кінці досліджуваної ділянки при послідовних збудженнях фокусуєчих елементів, розміщених на кожній балці.