

УДК 539.1.076

СИСТЕМА ДОПУСКОВ, КОРРЕКЦИИ И ИНДИКАЦИИ МАГНИТООПТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РЕЦИРКУЛЯТОРА SALO**И.С. Гук, С.Г. Кононенко, А.С. Тарасенко***Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1
e-mail: ast@kipt.kharkov.ua*

Поступила в редакцию 6 августа 2007 г.

Обсуждается концепция выбора магнитооптической системы рециркулятора SALO с точки зрения оптимизации допусков на точность юстировки магнитных элементов и оптимизации системы коррекции положения пучка. Выбран блочно-индивидуальный метод юстировки магнитных элементов. Путем численного моделирования выбрана система коррекции и исследована её эффективность. Приводятся значения допусков на точность юстировки магнитных элементов и требования к параметрам системы индикации положения пучка.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рециркулятор, ускоритель электронов, юстировка, коррекция, магнит.

Как известно, погрешности в юстировке магнитных элементов ускорителей приводят к возмущению магнитного поля (ΔB). На длине l такое возмущение обуславливает отклонение пучка на угол $\Delta B l / B \rho$. N случайных погрешностей поля ΔB вызывают среднеквадратичное смещение пучка [1]:

$$\langle d \rangle = \sqrt{\frac{N}{2}} \beta_0 \bar{\beta} \left\langle \frac{\Delta B l}{B \rho} \right\rangle, \quad (1)$$

где ρ - радиус кривизны траектории частицы, $\bar{\beta}$ - среднее значение функции фокусировки β ; β_0 - значение β -функции в данной точке; $\langle \dots \rangle$ - среднеквадратичная величина.

Из выражения (1) видно, что одно и то же возмущение магнитного поля ΔB может приводить к различным величинам смещения траектории пучка, что для минимизации влияния погрешностей в юстировке магнитных элементов на положение траектории пучка необходимо обеспечить минимальное значение функций фокусировки $\bar{\beta}$, β_0 при минимальном количестве магнитных элементов N . Эти требования необходимо учитывать при выборе магнитооптической системы, окончательный вариант которой является обычно результатом компромисса между указанными выше требованиями.

В принципе, располагая достаточным количеством корректоров, можно провести пучок через магнитооптическую систему и при достаточно грубой её юстировке. Однако такой путь не является оптимальным, т.к. ведет к увеличению числа магнитных элементов и, соответственно, индикаторов положения пучка, что может сделать установку вообще неработоспособной.

При разработке системы допусков, коррекции и индикации магнитооптической системы необходимо учитывать, что:

1. точность юстировки магнитных элементов определяет величину отклонения траектории частицы, подлежащую коррекции;
2. параметры корректирующих элементов (эффективная длина, напряженность магнитного поля) определяют максимальное отклонение, которое можно скорректировать;
3. параметры системы индикации (точность измерения положения пучка, расстояние между точками измерения) определяют эффективность процесса коррекции.

Перечисленные факторы взаимосвязаны, и поэтому проблему проводки пучка через магнитную систему установки SALO [2] необходимо решать в комплексе. В принципе, за отправную точку можно взять любой из перечисленных пунктов. Обычно исходят из точности юстировки магнитных элементов, поскольку эта величина не зависит от их рабочих характеристик.

Целью работы является выбор положения корректирующих магнитов в магнитной системе, позволяющих провести коррекцию орбиты при помощи минимального числа магнитов.

ЮСТИРОВКА МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЦИРКУЛЯТОРА SALO

Влияние точности и способов юстировки магнитных элементов на величину искажения равновесной траектории исследовалась путем численного моделирования динамики частиц с помощью программы TRANSPORT [3]. Было установлено, что наиболее эффективным является блочно-индивидуальный метод юстировки, при котором часть магнитных элементов юстируется независимо, а часть, объединенная в блоки,

юстируется сначала в блоках, а затем блоки устанавливаются в магнитную систему рециркулятора и юстируются как целое.

Магнитные корректоры, применяемые для корректировки траектории пучка в рециркуляторе, имеют следующие параметры: эффективная длина – 10 см, эффективное магнитное поле – 10^{-2} Тл. Это обуславливает следующие углы коррекции:

1. $E=9,5$ МэВ, $\theta_{\max}=57$ мрад;
2. $E=249,5$ МэВ, $\theta_{\max}=1,2$ мрад;
3. $E=489,5$ МэВ, $\theta_{\max}=0,6$ мрад.

С помощью численного моделирования было установлено, что искажения идеальной траектории в предполагаемых точках коррекции не превышают величин, доступных коррекции, при следующих точностях юстировки магнитных элементов:

I. Тракт инжекции.

1. дипольные магниты: $\Delta q_i=0,01$ см, $\Delta q'_i=1$ мрад;
2. квадрупольные линзы:
 - отдельная линза и линза в блоке: $\Delta q_i=0,003$ см, $\Delta q'_i=10^{-1}$ мрад;
 - блок линз: $\Delta q_i=0,005$ см, $\Delta q'_i=3 \cdot 10^{-1}$ мрад

II. Арки первого и второго оборотов.

1. дипольные магниты: $\Delta q_i=0,01$ см, $\Delta q'_i=10^{-1}$ мрад;
2. квадрупольные линзы:
 - отдельная линза и линза в блоке: $\Delta q_i=0,003$ см, $\Delta q'_i=10^{-1}$ мрад;
 - блок линз: $\Delta q_i=0,005$ см, $\Delta q'_i=3 \cdot 10^{-1}$ мрад.

На рис. 1 показана схема расположения магнитооптических элементов на двух рециркуляциях проектируемой базовой установки ИЯФиВЭ SALO.

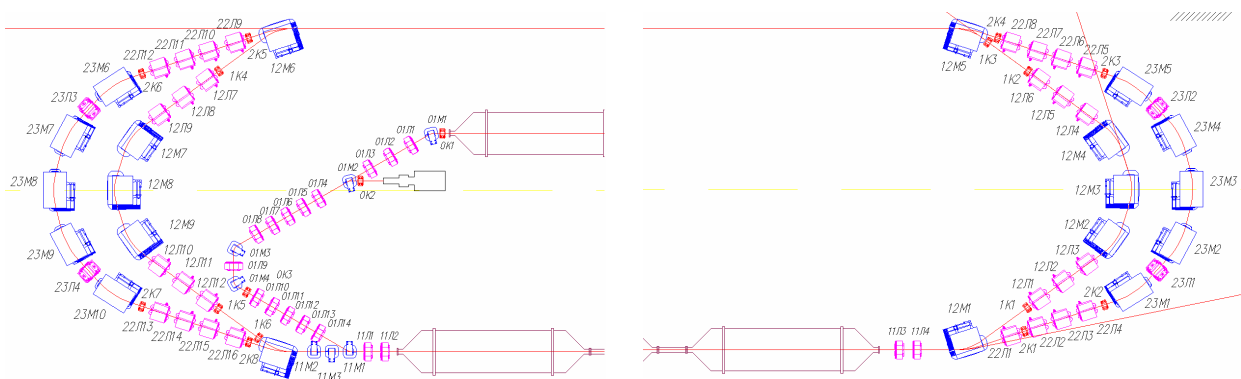


Рис. 1. Схема расположения магнитооптических элементов рециркулятора SALO.

На рис. 2 - рис. 6 приведена огибающая центральной траектории пучка при случайной реализации погрешностей юстировки для тракта инжекции неполяризованного пучка, первой и второй арки первого и первой и второй арки второго оборота соответственно. Буквой М на всех рисунках обозначены дипольные магниты, буквой Л обозначены квадрупольные линзы.

На рис. 2 погрешности юстировки дипольных магнитов 01М2-01М4 и 11М составляют: $\Delta q_i=0,01$ см, $\Delta q'_i=0,1$ мрад., отдельной линзы (01Л9) и линз в блоках- $\Delta q_i=0,003$ см, $\Delta q'_i=1$ мрад., блоков квадрупольных линз (01Л4-01Л8, 01Л10-01Л13, 11Л1-11Л2, 11Л3-11Л4) $\Delta q_i=0,005$ см, $\Delta q'_i=0,3$ мрад. На рис. 3 погрешности юстировки дипольных магнитов 12М1-12М5 составляют: $\Delta q_i=0,01$ см, $\Delta q'_i=0,1$ мрад., линз в блоках (12Л1-12Л6)- $\Delta q_i=0,003$ см, $\Delta q'_i=1$ мрад, блоков квадрупольных линз (12Л1-12Л3, 12Л4-12Л6), $\Delta q_i=0,005$ см, $\Delta q'_i=0,3$ мрад.

СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ И ИНДИКАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА В РЕЦИРКУЛЯТОРЕ

Результаты численного моделирования динамики частиц в рециркуляторе показали, что неточности юстировки электромагнитных элементов мало влияют на поперечные размеры пучка и, в основном, приводят к его отклонению от геометрической оси вакуумной камеры. Данные, приведенные на рис. 2 - рис. 5 указывают на то, что даже достаточно жесткие допуски на точность юстировки магнитных элементов не могут гарантировать проводку пучка через магнитную структуру рециркулятора. В связи с этим возникает необходимость в коррекции траектории пучка для предотвращения попадания его на стенки вакуумной камеры. Для этой цели служит система корректоров – дипольных магнитов, расположенных на определенных азимутах

и обладающих необходимыми параметрами.

С другой стороны, эффективная коррекция траектории пучка невозможна без знания с необходимой точностью параметров пучка (координат и углов) в точке коррекции. Это обстоятельство определяет требования к системе индикации (точность юстировки элементов системы, точность измерения координат пучка).

Рассмотрим систему коррекции, состоящую из двух дипольных магнитов с однородным полем протяженностью S разделенных прямолинейным промежутком длиной l .

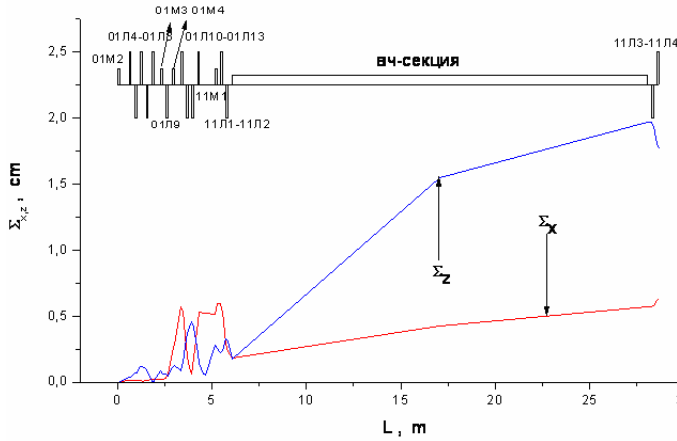


Рис. 2. Огибающая центральной траектории пучка, обусловленная случайными погрешностями в юстировке магнитных элементов, рассчитанная для тракта инжекции неполяризованного пучка.

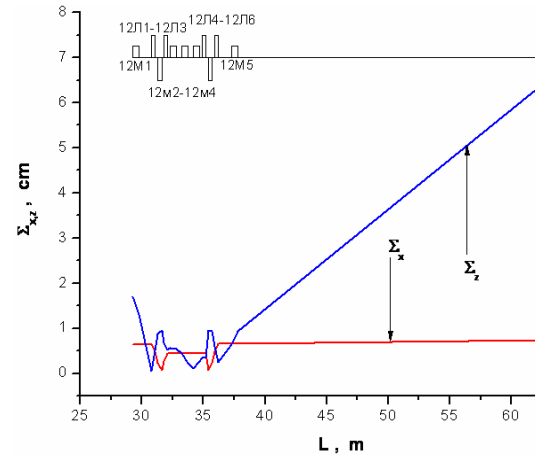


Рис. 3. Огибающая центральной траектории пучка на первой арке первого оборота рециркуляции, обусловленная случайными погрешностями в юстировке магнитных элементов.

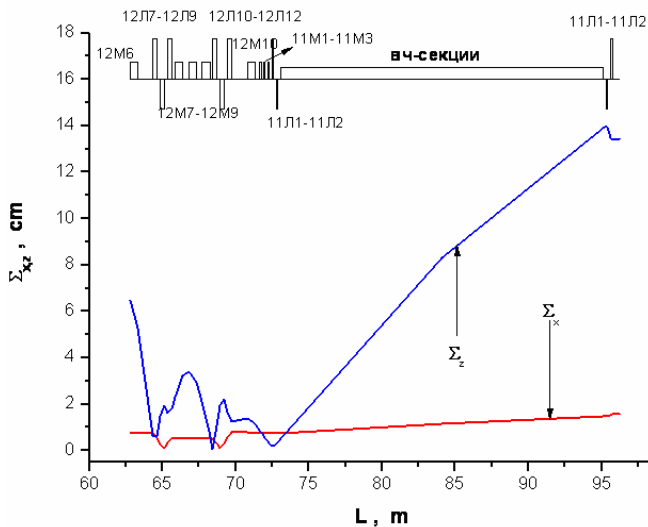


Рис. 4. Огибающая центральной траектории пучка на второй арке первого оборота рециркуляции обусловленная случайными погрешностями в юстировке магнитных элементов. Погрешности юстировки аналогичны рис. 1.

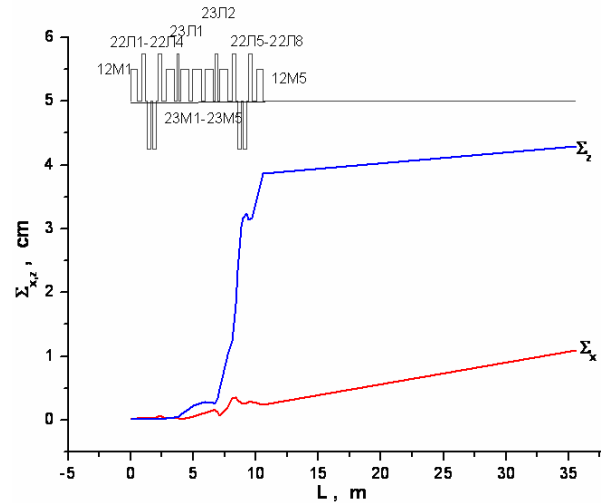


Рис. 5. Огибающая центральной траектории пучка на первой арке второго оборота рециркуляции, обусловленная случайными погрешностями в юстировке магнитных элементов. Погрешности юстировки аналогичны рис. 2.

Как правило, на практике реализуется ситуация, когда угол входа пучка в корректор $|q'_0| \ll 1$. Тогда в линейном по q'_0 приближении координата и угол пучка на выходе из второго корректирующего магнита равны:

$$q \approx q_0 + S^2/\rho_1 + l(S/\rho_1 + q'_0) + S^2/\rho_2, \quad (2)$$

$$q' \approx S\left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}\right) + q'_0. \quad (3)$$

Из условия полной коррекции $q=q'=0$ получаем:

$$\rho_1 = \frac{lS}{(S-l)q'_0}; \quad \rho_2 = \frac{lS}{(2l-S)q'_0}.$$

При условии $l \gg 1; lq'_0 \gg Sq'_0; (l-S)q'_0 \ll \Delta q'_0$

$$\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} \approx \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta q_0}{q_0} + \frac{S}{l} \frac{\Delta q'_0}{q'_0}, \tag{4}$$

$$\frac{\Delta \rho_2}{\rho_2} \approx 3 \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta q_0}{q_0} \quad (\Delta l/l \approx \Delta S/S). \tag{5}$$

Выражения (4) и (5) показывают зависимость точности определения величины магнитного поля корректоров ($\Delta B/B \approx \Delta \rho/\rho$) от погрешностей системы индикации ($\Delta S, \Delta l, \Delta q_0, \Delta q'_0$).

Из выражений (2), (3) следует:

$$\Delta q \cong \Delta q_0 + \Delta q'_0 l + \frac{\Delta \rho}{\rho^2} l S, \tag{6}$$

$$\Delta q' \cong \Delta q'_0 + \frac{\Delta \rho}{\rho^2} S. \tag{7}$$

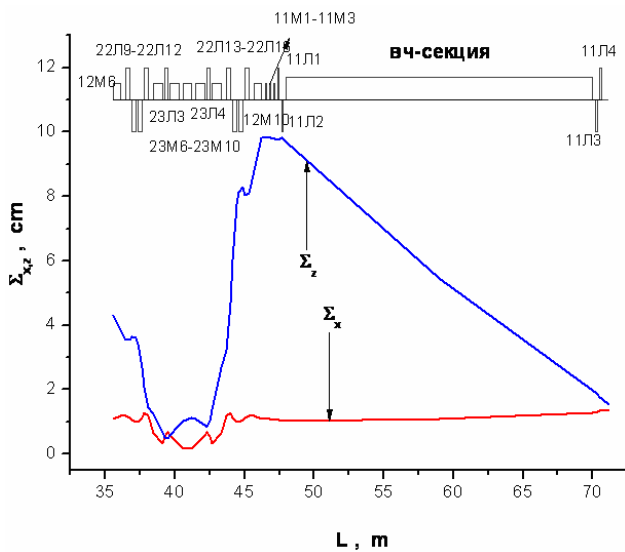


Рис. 6. Огибающая центральной траектории пучка, рассчитанная для второй арки второго оборота рециркуляции при наличии случайных погрешностей в юстировке магнитных элементов. Погрешности юстировки аналогичны рис. 1.

Если $l \gg S$, то относительная точность коррекции равна $\frac{\Delta q_{01}}{|q_{01}|} + \frac{\Delta S}{S}$ и не может быть лучше

относительной точности измерения координаты центра пучка в точке коррекции.

С целью определения необходимого и достаточного количества магнитных корректоров и их наиболее эффективного расположения с помощью программы TRANSPORT было проведено моделирование процесса коррекции равновесной траектории пучка для случая наиболее неблагоприятной реализации допусков на точность юстировки магнитных элементов, т.е. когда все погрешности одного знака.

Результаты моделирования и места расположения корректоров представлены на рис. 6 - рис. 11. Здесь $\sigma_{x,z}$ – огибающая пучка в рециркуляторе, обусловленная эмиттансом инжектируемого пучка, $\Delta_{x,z}$ – отклонение возмущенной траектории пучка от идеальной.

Из рис. 7 видно, что, корректируя с помощью X,Z-корректора 0K2 углы входа X' и Z' в магнит 01M2 можно провести пучок до входа в первую арку с максимальным отклонением в тракте инъекции $|\Delta_x| \leq 0,4$ см $|\Delta_z| \leq 0,2$ см. При этом максимальное отклонение равновесной орбиты по вертикали в первой арке составляет $|\Delta_z| \leq 0,9$ см на участке, где диаметр вакуумной камеры равен 5 см.

Коррекция центральной траектории производится в X- и Z-плоскостях. Максимальный угол коррекции составляет $8 \cdot 10^{-1}$ мрад при максимально возможной величине 57 мрад.

Обеспечивая с помощью пары корректоров 1K2 и 1K3 (рис. 8) равенство $Z=Z' \sim 0$ на входе во вторую арку, можно провести пучок через вторую арку при максимальном отклонении траектории от идеальной $|\Delta_{x,z}| \leq 2$ см. В этом случае максимальный угол коррекции составляет 1,2 мрад при максимально возможном 1,5 мрад.

С помощью корректоров 1K5 и 1K6, расположенных между линзой 12Л12 и магнитом 12М10 (рис. 9),

Выражения (6), (7) показывают зависимость точности коррекции от точности измерения характеристик пучка на входе в систему коррекции ($\Delta q, \Delta q'$) и точности определения магнитного поля корректоров.

Коррекция может быть неполной, т.е. когда выполняется лишь одно из условий: $q=0$ или $q'=0$. В этом случае используется один корректор. При условии:

$$q = q_0 + \frac{S^2}{\rho_1} + l \left(\frac{S}{\rho_1} + q'_0 \right) = 0$$

$$\rho_1 = - \frac{S^2 + lS}{q_0 + lq'_0}, \quad q_0 + lq'_0 \cong q_{01} \text{ - координата}$$

пучка в точке коррекции при выключенном корректоре. Знак ρ_1 определяет направление магнитного поля корректора.

В этом случае

$$\frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} = \frac{\Delta q_{01}}{|q_{01}|} + \frac{(3S+l)\Delta S}{S^2+lS} \text{ при условии } \Delta S = \Delta l.$$

можно обеспечить $Z=Z' \sim 0$ на входе в магнит 12M1 (первый магнит третьей арки). Это, в свою очередь, обеспечит прохождение пучка до магнита 23M5 с максимальным отклонением от идеальной траектории $|\Delta_z| \leq 0,6$ см. Угол коррекции при этом, как показывают расчеты, не превысит 6 мрад.

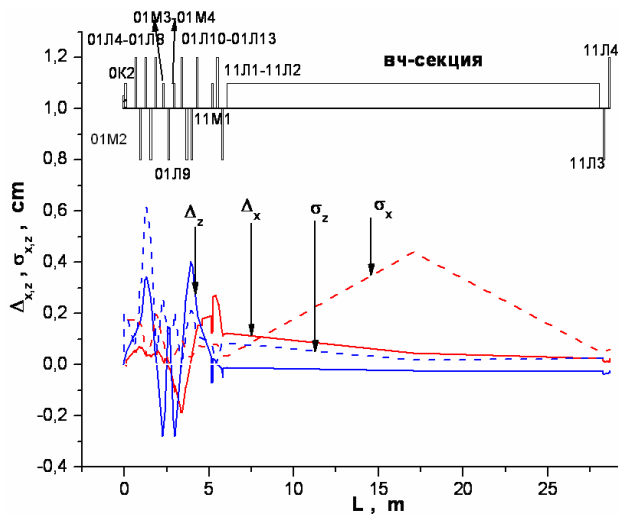


Рис. 7. Результаты моделирования процесса коррекции искажения центральной траектории на тракте инжекции неполяризованного пучка. Корректор ОК2 расположен перед магнитом 01M2. $\Delta_{x,z}$ -отклонение центра от идеальной траектории пучка после коррекции, $\sigma_{x,z}$ -размеры пучка.

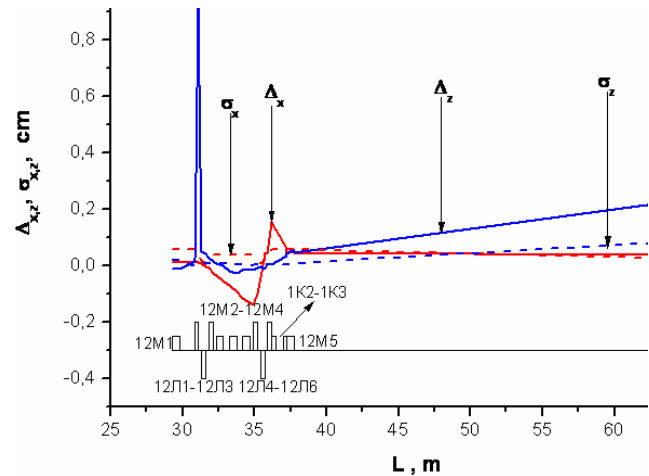


Рис. 8. Результаты моделирования процесса коррекции искажения центральной траектории пучка на участке «первая арка первого оборота рециркуляции – прямолинейный промежуток». Корректоры 1K2, 1K3 расположены в конце арки. $\Delta_{x,z}$ -отклонение центра от идеальной траектории пучка после коррекции, $\sigma_{x,z}$ -размеры пучка.

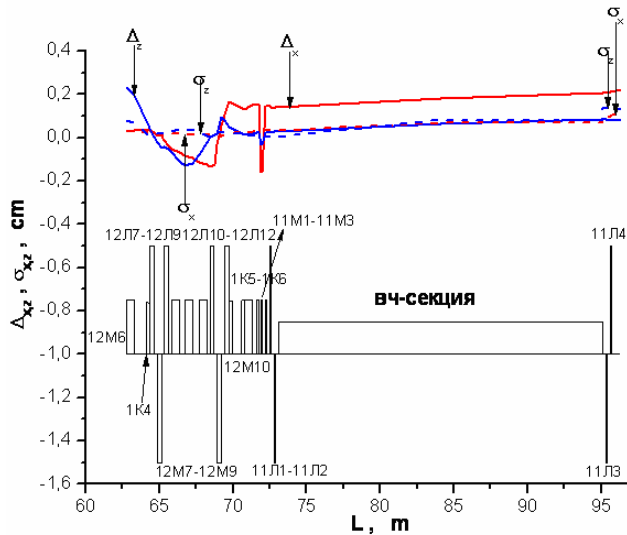


Рис. 9. Результаты моделирования процесса коррекции искажения центральной траектории пучка на участке вторая арка первого оборота рециркуляции - ускоряющий промежуток. Корректор 1K4 расположен в начале, корректоры 1K5, 1K6 – в конце арки.

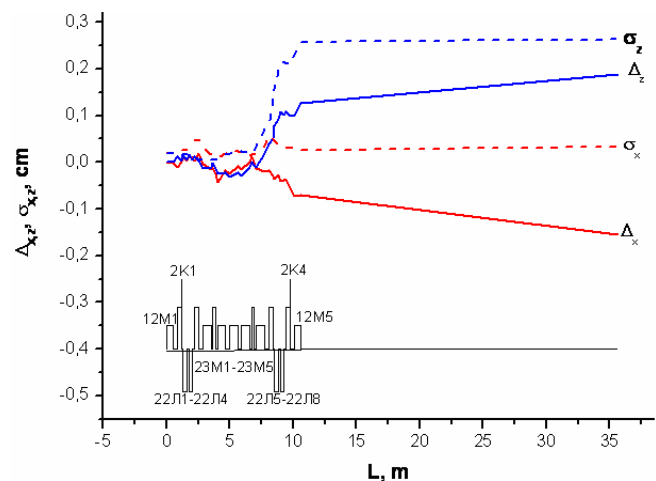


Рис. 10. Результаты моделирования процесса коррекции искажения центральной траектории пучка на участке первая арка второго оборота рециркуляции - прямолинейный промежуток. Корректоры 2K1 и 2K4 расположены в начале и в конце арки соответственно.

С помощью корректоров 2K1, 2K4, 2K6, 2K7 и 2K8 (рис. 10 и 11) можно обеспечить максимальные отклонения от идеальной траектории $|\Delta_z| \leq 0,3$ см, $|\Delta_x| \leq 0,2$ см. Угол коррекции при этом, как показывают расчеты, не превысит 0,62 мрад.

Как показывают результаты численного моделирования (см. рис. 7 – рис. 11), точность измерения положения пучка парами датчиков, расположенными перед магнитами 12M1, 12M6, 23M5, 23M9 и 12M10 должна быть не хуже его удвоенного полуширины, т.е. 0,05-0,1 см. Это позволит на минимальной базе ~50 см

измерять X' и Z' с точностью ~ 1 мрад, что, в принципе, позволит практически полностью скорректировать искажения траектории пучка.

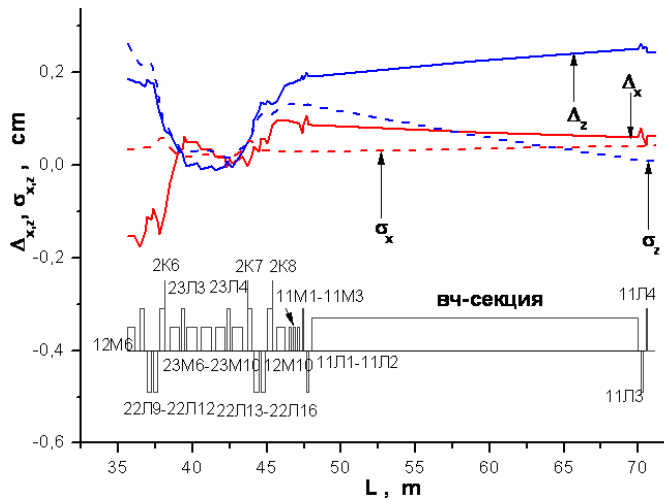


Рис. 10. Результаты моделирования процесса коррекции искажения центральной траектории пучка на участке вторая арка второго оборота рециркуляции - ускоряющий промежуток.

Корректоры расположены в начале и в конце арки. $\Delta_{x,z}$ -отклонение центроиды от идеальной траектории пучка после коррекции, $\sigma_{x,z}$ -размеры пучка.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- наиболее эффективным с точки зрения минимизации требований к точности юстировки магнитных элементов рециркулятора SALO является блочно-индивидуальный метод юстировки, численные значения соответствующих величин приводятся;
- с помощью пяти X,Z-корректоров возможно скорректировать искажения равновесной траектории и обеспечить прохождение пучка до магнита В15 с максимальным отклонением от идеальной траектории не более 0,6 см;
- с помощью пяти X,Z-корректоров возможно скорректировать искажения равновесной траектории и обеспечить прохождение пучка до выхода из рециркулятора с максимальным отклонением от идеальной траектории не более 0,3 см;
- точность измерения положения пучка для обеспечения необходимой точности коррекции траектории должна быть не хуже 0,05-0,1 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D.R. Douglas and R.C. York Perturbation Effects in the CEBAF Beam Transport System //Proc. 1987 IEEE Part. Accel. Conf., Washington, D.C. March, 1987. - P.1295-1297.
2. Guk I.S., Dovbnya A.N., Kononenko S.G., Peev F.A., Tarasenko A.S., M. van der Wiel, J.I.M. Botman Isochronous Magneto-optical Structure of Recirculator SALO //Proc. of EPAC, Edinburg, Scotland, 26-30 June 2006. - P. 2035-2037.
3. Karl L. Brown, D. C. Carey, Ch. Iselin, and F. Rothacker TRANSPORT - A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems. CERN 73-16, revised as CERN 80-4, CERN, 1980.

THE SYSTEMS OF TOLERANCES, CORRECTION AND INDICATION OF MAGNETOOPTICAL STRUCTURE SALO RECIRCULATOR

I.S. Guk, S.G. Kononenko, A.S. Tarasenko

National Scientific Centre "Kharkov Institute of Physics and Technology",
1 Akademichna st. 61108 Kharkov, Ukraine

From the point of view of optimization of the tolerances on exactitude of magnetic elements alignment and optimization of the beam position correction system the conception of choice of the magneto-optical system of SALO facility is chosen. The combined modular and individual method of magnetic elements alignment is chosen. By numerical simulation the system of the beam correction is chosen and its efficiency is investigated. The values of adjustment accuracy of magnetic elements and the requirements to parameters of beam position indication system are submitted.

KEY WORDS: recirculator, electron accelerator, adjustment, correction, magnet.