

## РАССТАНОВКА ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ В КОЛЛАЙДЕРЕ КОМПЛЕКСА NICA

*А. В. Филиппов*<sup>1</sup>

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Эффект роста фазового объема пучка при его обращении в вакуумной камере циклического ускорителя, вызванный искажением замкнутой орбиты, является одним из ограничивающих факторов акцептанса ускорителя. Для уменьшения искажений замкнутой орбиты, вызванных разбросом эффективных длин (интегралов магнитного поля) дипольных магнитов, предлагается располагать дипольные магниты по кольцу особым образом. В статье рассматриваются процедуры такого особого расположения дипольных магнитов, позволяющие оптимизировать динамические характеристики пучка в двух кольцах коллайдера комплекса NICA. На основе одной из предложенных процедур выбрана расстановка дипольных магнитов.

The beam phase volume blowup effect during the beam circulation in cyclic accelerator vacuum chamber, caused by the closed orbit distortion, is one of the limiting factors of the accelerator acceptance. In order to reduce the closed orbit distortions due to the effective lengths spread (magnetic field integrals) of the dipole magnets, it is proposed to arrange the dipole magnets around the ring in a special procedure. The procedures for such special dipole magnets arrangement, which allow optimizing the beam dynamic characteristics in two rings of the collider of the NICA complex, are discussed. Based on one of the proposed procedures, the arrangement of dipole magnets was chosen.

PACS: 29.20.—с

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема коррекции магнитного поля ускорителя — это одна из наиболее важных задач при его создании. Решение этой задачи происходит не только на всем этапе проектирования ускорителя, но и при его сборке. Безусловно, применение большого числа корректирующих элементов может решить задачу коррекции магнитного поля, но все же иногда не полностью. Часто наиболее эффективными могут оказаться методы, не требующие установки дополнительных корректирующих элементов, дополнительных систем питания. К таким методам относятся, например, шиммирование магнитного поля дипольных магнитов, юстировка — поперечные смещения и повороты вокруг продольной оси квадрупольных линз с целью коррекции орбиты и резонансов бетатронных колебаний, а также оптимальная расстановка структурных элементов в кольце ускорителя, учитывающая магнитные измерения этих элементов.

Далее обсуждаются возможности применения последнего метода коррекции применительно к сооружаемому в ОИЯИ коллайдеру комплекса NICA [1].

---

<sup>1</sup>E-mail: philippov@jinr.ru

## СТРУКТУРА МАГНИТНОЙ ОПТИКИ КОЛЛАЙДЕРА

Коллайдер NICA [1] имеет форму кольцевого ускорителя с прямолинейными промежутками и состоит из двух прямолинейных секций — северной и южной и двух арок — восточной и западной, составляющих два суперпериода. Периметр коллайдера — 503,04 м (2 периметра нуклотрона).

Орбиты пучков располагаются одна над другой на расстоянии 0,32 м. Циркулирующие пучки (рис. 1) сводятся в двух местах встречи. В первой точке встречи (IP1) располагается многофункциональный детектор частиц (MPD). Во второй точке встречи (IP2) располагается детектор по спиновой физике (SPD). Сведение орбит пучков

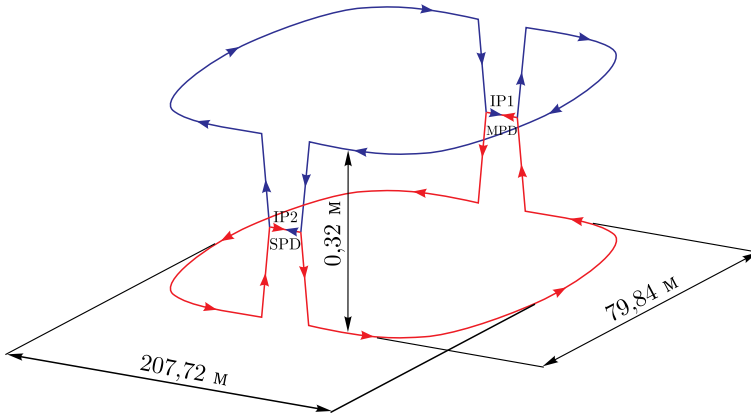


Рис. 1. Схема циркуляции пучков в коллайдере

NICA, пучок ядер золота, линейная оптика,  $Q_x/Q_y = 9,44/9,44$

Пучок 2 (по часовой стрелке),  
верхнее (синее, 1) кольцо

Пучок 1 (против часовой стрелки),  
нижнее (красное, 2) кольцо

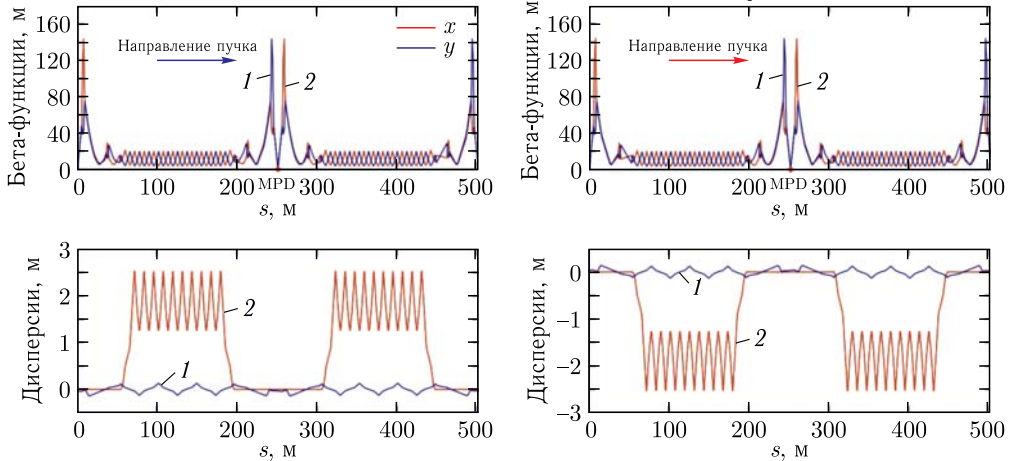


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Оптические функции магнитной структуры коллайдера для рабочей точки 9,44/9,44

в точках встречи IP1 и IP2 осуществляется по вертикали и обеспечивается системой вертикального сведения/разведения. Детальное описание оптики коллайдера приведено в [2]. На рис. 2 приведены оптические функции двух колец линейной структуры коллайдера для рабочей точки 9,44/9,44.

## ОПИСАНИЕ ДАННЫХ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

К настоящему моменту изготовлено 86 дипольных магнитов коллайдера, которые испытаны при криогенных температурах и для которых завершены магнитные измерения (МИ) при трех значениях токов основного источника питания, т.е. 2300 А (1 ГэВ/нуклон), 6890 А (3 ГэВ/нуклон) и 10440 А (4,5 ГэВ/нуклон). Из 86 готовых дипольных магнитов для размещения в арках коллайдера могут быть использованы 85, так как один магнит будет использоваться для измерительного периода коллайдера. Данные МИ для 85 дипольных магнитов были использованы для их расстановки в арках коллайдера.

Одна запись протокола МИ — это набор для верхнего и нижнего «этажа» конкретного двухпертурного дипольного магнита коллайдера NICA, состоящий из номера обмотки (№), характеристики наличия/отсутствия дополнительных связей, эффективной длины ( $l_{эф}$ ) магнита в мм, угла поворота медианной плоскости магнита на соответствующем «этаже» ( $\alpha$ ) в мрад, интеграла поля ( $BL$ ) в Тл·м и 6 гармоник магнитного поля (4 «прямых» —  $b_2, b_3, b_5, b_7$  и 2 «косых» —  $a_2, a_3$ ) в относительных единицах (1 отн. ед. соответствует  $10^{-4}$ ).

Гармоники  $b_1$  и  $a_1$  в протоколе МИ не представлены, и поэтому были вычислены по имеющимся в протоколе данным, а именно: по интегралу магнитного поля и углу поворота медианной плоскости дипольного магнита на соответствующем «этаже»:

$$b_{1,i} = 10^4 (BL_i / \overline{BL}_i - 1) \quad \text{и} \quad a_{1,i} = 10^4 \sin \alpha_i, i = \overline{1,85}. \quad (1)$$

Здесь  $BL_i$  — измеренные интегралы поля в Тл·м;  $\overline{BL}_i$  — средняя величина интеграла поля;  $\alpha_i$  — угол поворота медианной плоскости в радианах.

Наборы вида №,  $l_{эф}$ ,  $b_1, b_2, b_3, b_5, b_7, a_1, a_2$  и  $a_3$  были использованы при проведении расстановки дипольных магнитов в арках коллайдера.

## ПРОЦЕДУРА РАССТАНОВКИ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ

Всего из протокола МИ можно собрать 85 записей. Эти записи были сгруппированы по характеристикам наличия/отсутствия дополнительных связей. В первой группе из общего числа записей 41 запись не имеет дополнительных связей, а во второй группе без дополнительных связей — 44 записи. Наличие/отсутствие дополнительной связи накладывает условие на размещение дипольных магнитов в арках колец коллайдера, а именно: двухпертурные магниты из числа магнитов с дополнительными связями могут располагаться (быть расставленными) только в северо-западной и/или северо-восточной части арок коллайдера, эти области коллайдера близки к детектору MPD и на рис. 3 показаны цветом.

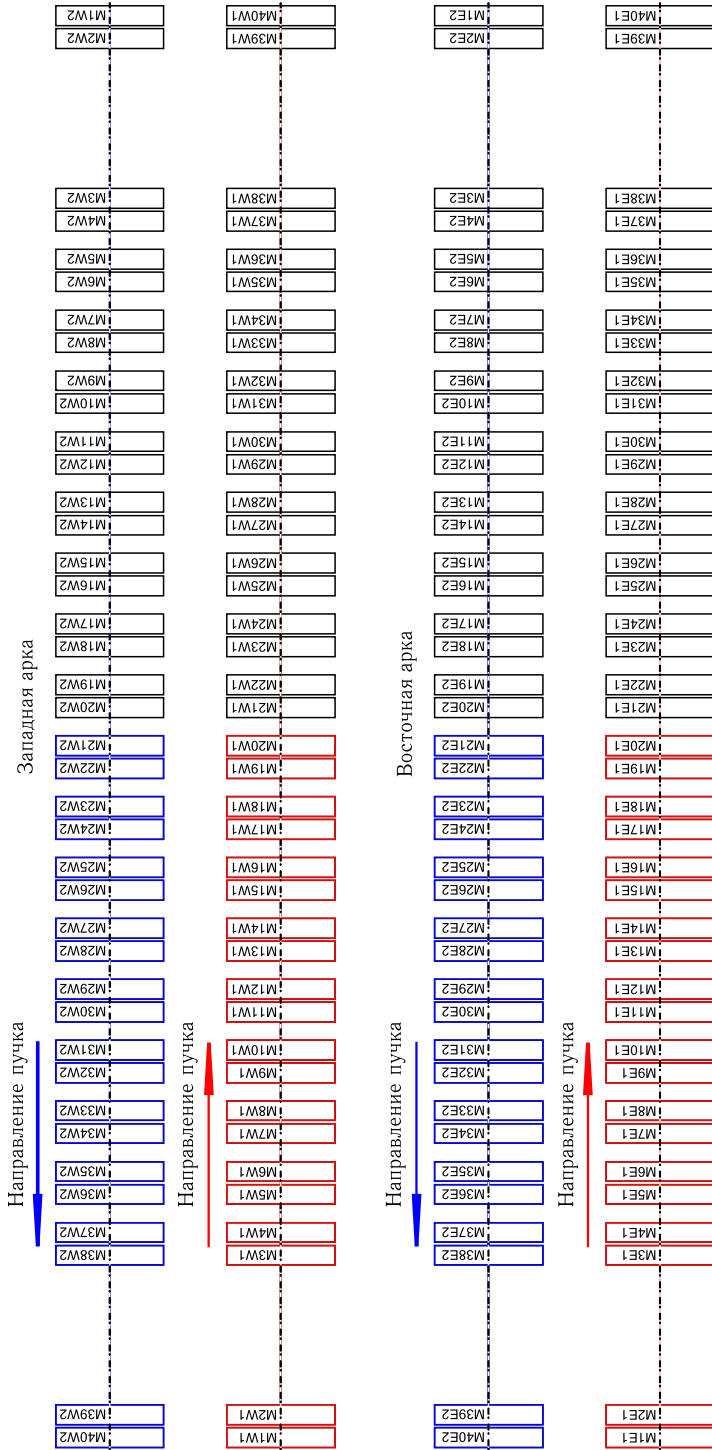


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Схема расположения дипольных магнитов с дополнительными связями (синим — в верхнем кольце, красным — в нижнем) в арках коллайдера

Далее были рассмотрены два способа расстановки дипольных магнитов:

1) независимо из первой и второй групп записей дипольных магнитов с/без дополнительных связей случайно выбирались 40 записей для расстановки в арках колец коллайдера;

2) в каждой из двух групп записей дипольных магнитов с/без дополнительных связей составлялись пары, ранжированные по типу «длинный–короткий» по интегралу магнитного поля записи  $BL_i$ , как это было сделано при расстановке дипольных магнитов в бустере [3].

Число всех возможных комбинаций для первого способа равно  $(40!)^2$ , а для второго способа равно  $(20!)^2$ , что существенно меньше. Отметим здесь, что для второго способа не удалось составить все пары, ранжированные по типу «длинный–короткий», в части из составленных пар такое ранжирование было нарушено. И поэтому отбор производился на основе результатов, полученных первым способом.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее, для первого способа производился расчет замкнутой орбиты (ЗО) в каждом из колец коллайдера с помощью программы MAD-X [4]. Измеренные гармоники магнитного поля из данных МИ задавались модулем EFCOMP программы MAD-X [4].

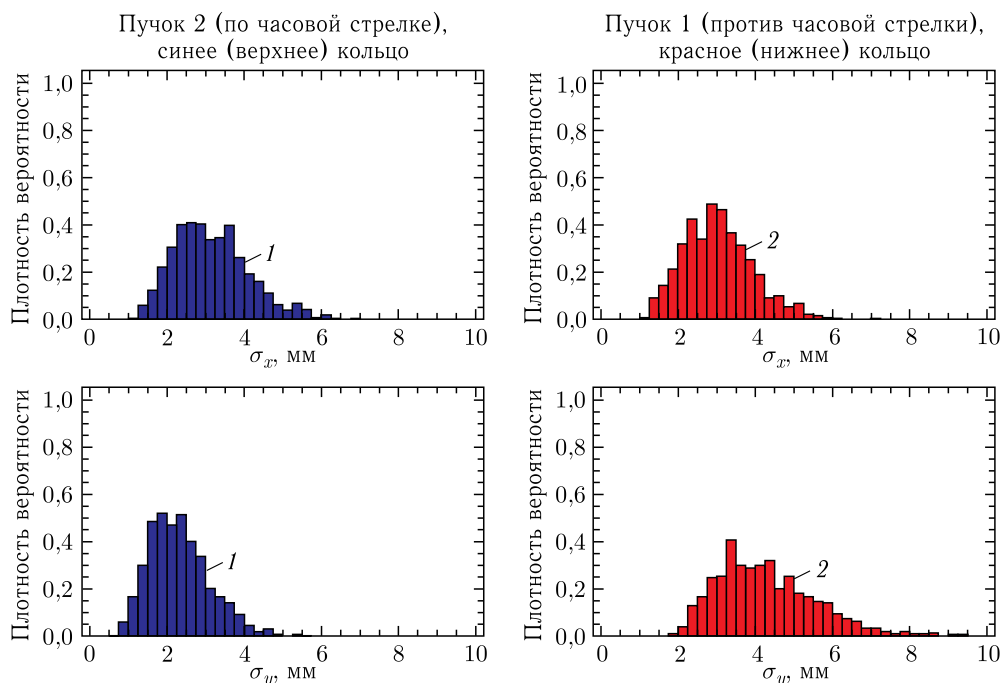


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Распределение СК-отклонений ЗО пучка по горизонтали и вертикали (синим, 1 — в верхнем кольце, красным, 2 — в нижнем) по серии статистических розыгрышей расстановок дипольных магнитов в арках коллайдера при токе 2300 А (1 ГэВ/нуклон)

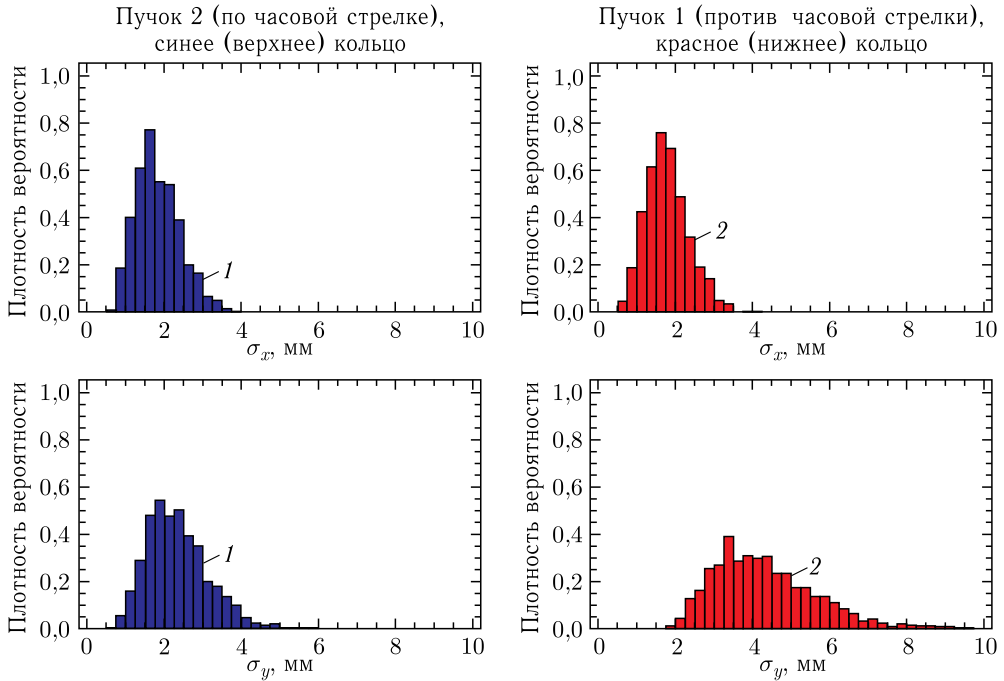


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Распределение СК-отклонений ЗО пучка по горизонтали и вертикали (синим, 1 — в верхнем кольце, красным, 2 — в нижнем) по серии статистических розыгрышей расстановок дипольных магнитов в арках коллайдера при токе 6890 А (3 ГэВ/нуклон)

Для значений токов 2300, 6890 и 10440 А были произведены расстановки двух-апертурных магнитов в арках коллайдера. На рис. 4–6 приведены распределения СК-отклонений по горизонтали и вертикали ЗО, полученные после серии из 1000 розыгрышей расстановок дипольных магнитов в арках коллайдера для первого способа, описанного выше.

Целевая функция для отбора лучшего результата из серии статистических испытаний выбиралась в виде

$$F(\sigma_{x,1}, \sigma_{x,2}, \sigma_{y,1}, \sigma_{y,2}) = (\sigma_{x,1}^2 + \sigma_{x,2}^2) + 4(\sigma_{y,1}^2 + \sigma_{y,2}^2). \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_{x,1}$  — среднее квадратичное (СК) отклонение ЗО пучка по горизонтали, а  $\sigma_{y,1}$  — СК отклонение ЗО пучка в первом кольце по вертикали; аналогичные величины для второго кольца —  $\sigma_{x,2}$  и  $\sigma_{y,2}$ . Численный коэффициент 4 в формуле (2) — это квадрат отношения полуосей  $a$  (по горизонтали) и  $b$  (по вертикали) апертуры вакуумной камеры коллайдера в арках, это отношение можно принять  $a^2/b^2 \approx 4$ .

В таблице приведены характеристики лучшей ЗО по горизонтали и вертикали в двух кольцах коллайдера, а именно: СК-отклонение, минимальное и максимальное отклонение.

Отметим, что после серии из 1000 статистических испытаний для значений токов 2300, 6890 и 10440 А наилучшая, т. е. с наименьшими отклонениями ЗО по гори-

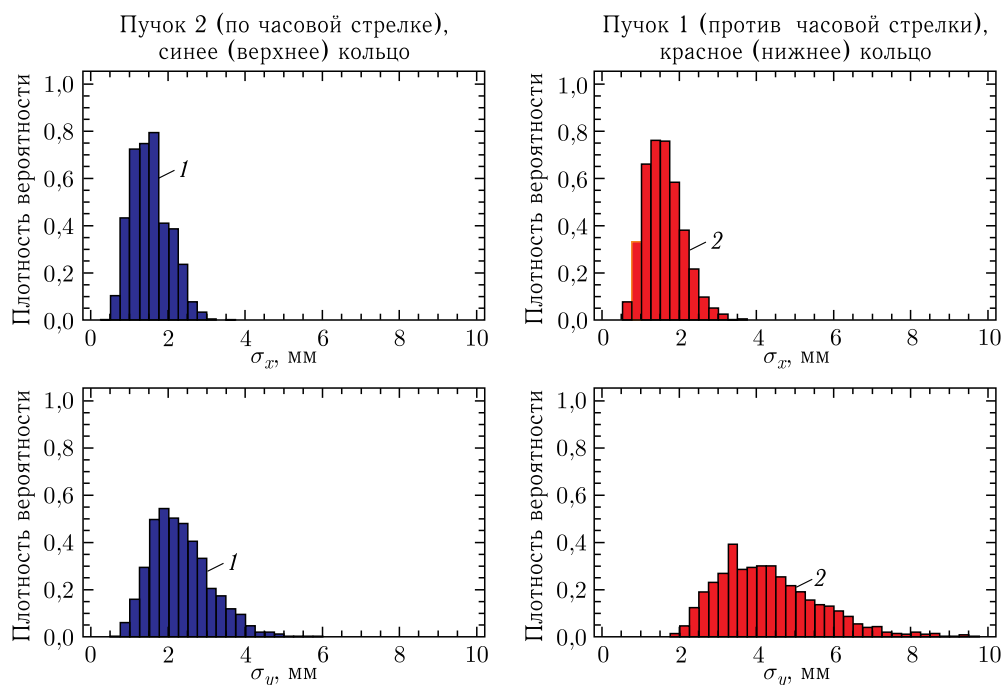


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Распределение СК-отклонений ЗО пучка по горизонтали и вертикали (синим, 1 — в верхнем кольце, красным, 2 — в нижнем) по серии статистических розыгрышей расстановок дипольных магнитов в арках коллайдера при токе 10440 А (4,5 ГэВ/нуклон)

#### Характеристики наилучшей ЗО для токов 2300, 6890 и 10440 А

Замкнутая орбита	Ток, А	$\sigma_x/\sigma_y$ , мм	$x_{\min}/x_{\max}$ , мм	$y_{\min}/y_{\max}$ , мм
Первое (красное) кольцо	2300	2,4/2,4	-5,9/4,7	-7,7/3,9
Второе (синее) кольцо		2,2/1,1	-6,8/5,9	-2,7/2,9
Первое (красное) кольцо	6890	2,5/2,4	-5,6/5,2	-7,7/3,9
Второе (синее) кольцо		2,2/1,1	-5,4/6,4	-2,7/3,0
Первое (красное) кольцо	10440	2,5/2,4	-5,6/5,2	-7,7/3,9
Второе (синее) кольцо		2,2/1,1	-5,4/6,4	-2,7/3,0

зонтанти и вертикали в двух кольцах коллайдера, расстановка дипольных магнитов в арках коллайдера оказалась одной и той же. Номер этой расстановки — 573.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность руководителю сектора № 4 моделирования и измерений полей элементов ускорителей В. В. Борисову, руководителю отдела НЭОСМиТ ЛФВЭ Д. Н. Никифорову за подготовленные и предоставленные данные магнитных измерений. Кроме того, автор благодарен И. Н. Мешкову, Г. Г. Ходжибагиану и В. А. Лебедеву за проявленный интерес к работе и полезные замечания, а также А. О. Сидорину, С. А. Костромину, М. М. Шандову и А. В. Тузику за обсуждения в процессе выполнения данной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование расстановки дипольных магнитов в кольцах коллайдера комплекса NICA. Найдена оптимальная расстановка дипольных магнитов, обеспечивающая при трех значениях токов основного источника питания СК-отклонения по горизонтали не более 3 мм, по вертикали не более 2,5 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический проект комплекса NICA. Дубна: ОИЯИ, 2015.
2. *Костромин С. А., Козлов О. С., Тузиков А. В., Филиппов А. В.* // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17, № 4(229). С. 422–428.
3. *Емельяненко В. Н., Казинова О., Михайлов В. А., Филиппов А. В.* // Там же. С. 429–434.
4. Methodical Accelerator Design. <http://madox.web.cern.ch/madox/>.

Получено 18 ноября 2022 г.