

КОРРЕКТИРУЮЩИЕ МАГНИТЫ БУСТЕРА И КОЛЛАЙДЕРА NICA

*М. М. Шандов¹, В. В. Борисов, А. В. Бутенко, О. Казимова,
С. А. Костромин, О. С. Козлов, В. А. Михайлов, Т. Парфило,
А. В. Филиппов, Е. М. Сыресин, А. В. Тузиков, Г. Г. Ходжибагиян*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Ускорительный комплекс NICA включает в себя две цепочки инъекции, новый сверхпроводящий бустерный синхротрон с энергией 600 МэВ/нуклон, действующий сверхпроводящий синхротрон нуклотрон и новый сверхпроводящий коллайдер, состоящий из двух накопительных колец длиной около 503 м каждый. Для компенсации влияния краевых полей и ошибок установки структурных элементов магнитной оптики, неоднородностей магнитных полей и «натуральной» хроматичности разработана система коррекции. В статье представлены основные параметры, характеристики и расчеты магнитных полей корректирующих магнитов бустера и коллайдера NICA.

The NICA accelerator complex will consist of two injector chains, a new 600 MeV/u superconducting booster synchrotron, the existing superconducting synchrotron Nuclotron, and the new superconducting collider that has two storage rings each of about 503 m in circumference. The influence of the fringe fields and misalignments of the structure magnets, the field imperfections and natural chromaticity should be corrected by the correction system. The main parameters, arrangements and the field calculations of the NICA Booster's and Collider's corrector magnets are presented.

PACS: 41.85.Lc; 29.20.D; 29.20.Dh; 29.20.db; 29.20.Lq; 41.85.-p; 07.05.Tr

ВВЕДЕНИЕ

Новый сверхпроводящий бустерный синхротрон (бустер) с рабочей энергией 600 МэВ/нуклон и периметром около 211 м располагается внутри железного яра синхрофазотрона. Оптическая структура бустера включает четыре суперпериода, содержащих по пять ДФО-ячеек, каждая из которых состоит из двух секторных дипольных магнитов, одной дефокусирующей и одной фокусирующей линз, а также одну ячейку, состоящую из одной дефокусирующей и одной фокусирующей линз без дипольных магнитов [1, 2]. Фокусирующие и дефокусирующие линзы объединены в дублет. Конструкция и основные характеристики структурных магнитов приведены в [3]. Система коррекции бустера включает 32 магнита: 24 дипольных и 8 мультипольных [4].

¹E-mail: shandov@jinr.ru

Коллайдер NICA состоит из двух арок и двух прямолинейных участков с точками встречи [2]. В арках применена ФОДО-оптика, включающая 12 периодов. ФОДО-ячейки состоят из двухапертурных дипольных и квадрупольных магнитов с расстоянием между пучками 320 мм [3]. В систему коррекции входят 128 корректирующих магнитов: 124 для каждого пучка (46 в арках и 16 в прямолинейных участках) и 4 общих для обоих пучков.

ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ

Система коррекции предназначена для компенсации систематических и случайных ошибок магнитной оптики. Основные источники ошибок — отклонение величины интеграла и неоднородность магнитного поля, краевые поля и ошибки установки структурных магнитных элементов. Также необходима коррекция «натуральной» хроматичности и связи вертикальных и горизонтальных бетатронных колебаний. При разработке системы коррекции учтены оптическая структура, качество магнитного поля и возможности системы юстировки магнитных элементов. Требуемые величины магнитного поля и число ампер-витков приведены в табл. 1. Величина нелинейности магнитного поля определяется как $B_n = 1/n! \partial B_y^n / \partial x^n$, $n = 0, 1, \dots$

Таблица 1. Задачи системы коррекции

| Тип поля | Задачи коррекции | Поле бустер/коллайдер | Ампер-витки |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| «Прямой» диполь (B_0) | Горизонтальная орбита | 0,08/0,15 Тл | 5500/11500 |
| «Косой» диполь (A_0) | Вертикальная орбита | 0,08/0,15 Тл | 5500/11500 |
| «Косой» квадруполь (A_1) | Коррекция связи колебаний | 0,6/3 Тл/м | 4200/12500 |
| «Прямой» секступоль (B_2) | Хроматичность | 50/175 Тл/м ² | 3900/8260* |
| «Косой» секступоль (A_2) | Ошибки оптики | 50/— Тл/м ² | 3900/— |
| «Прямой» октуполь (B_3) | Влияние краевых полей | 600/1300 Т/м ³ | 2400/4890 |

*Среднее значение для трех слоев.

КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТА

Конструкция корректирующих магнитов нуклотрона легла в основу корректоров бустера и коллайдера. Это неявнополюсный сверхпроводящий магнит с железным яром и секторными обмотками.

Магнитный полюс формируется намоткой изолированного сверхпроводящего провода вокруг сердечника из стеклотекстолита (рис. 1). Намотка всех полюсов, составляющих один слой, производится без соединения провода (соединения предусмотрены только с токоподводящими элементами в начале и в конце обмотки). Размеры сердечника определяются количеством полюсов магнита. Сектор дипольной обмотки удален для подавления «разрешенной» гармоники B_2 .

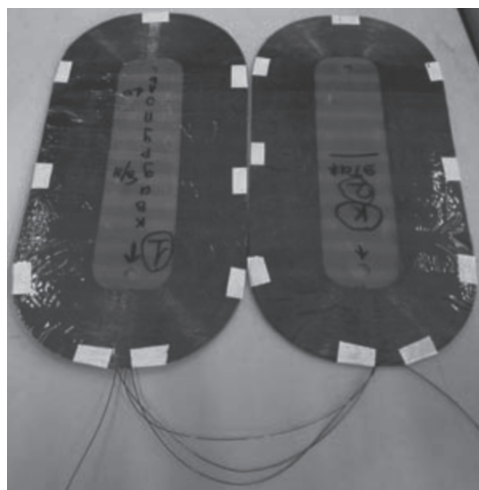


Рис. 1. Катушка после намотки

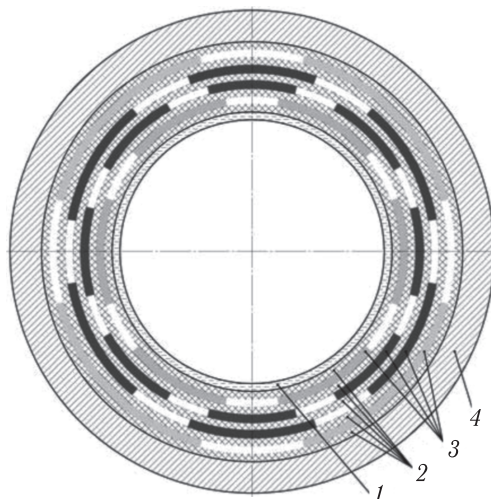


Рис. 2. Центральное сечение корректирующего магнита: 1 — охлаждающий цилиндр; 2 — проставка; 3 — обмотки; 4 — железное ярмо

После намотки обмотка (рис. 2, поз. 3) наклеивается на поверхность проставки 2 и формирует один слой. Первый слой устанавливается на охлаждающий цилиндр 1; каждый последующий слой устанавливается на предыдущий. Для улучшения теплопередачи между охлаждающим цилиндром и слоями в эпоксидный компаунд добавляют соли редкоземельных металлов, имеющих высокую теплоемкость при гелиевых температурах. Охлаждающий цилиндр с обмотками устанавливается в железное ярмо 4. Железное ярмо изготавливается из пластин изотропной электротехнической стали М530-65А. Основные этапы производства корректирующих магнитов представлены на рис. 3.

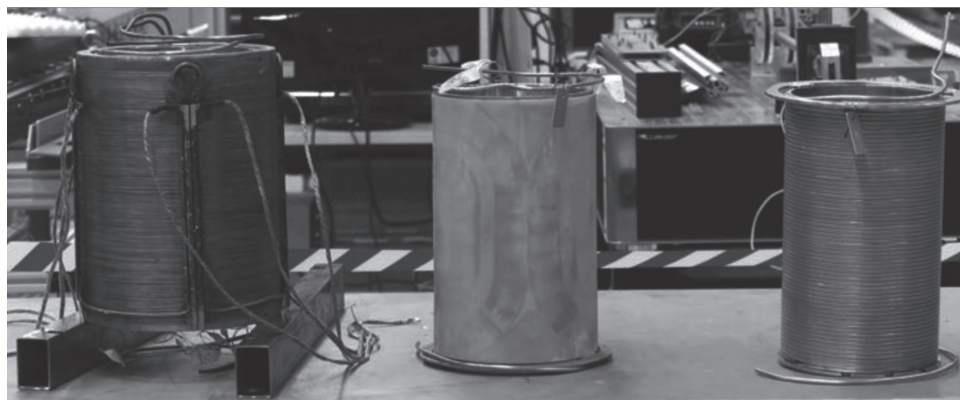


Рис. 3. Основные этапы производства корректирующих магнитов: охлаждающий цилиндр (справа), сборка с обмотками (в центре), сборка с железным ярмом (слева)

РАСЧЕТЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Для расчета величины и качества магнитного поля в центре магнита построена аналитическая модель на основе закона Био–Савара–Лапласа с использованием метода изображений [5, 6]. Также был выполнен двумерный расчет методом конечных элементов (МКЭ) в программе Орега TOSCA (рис. 4).

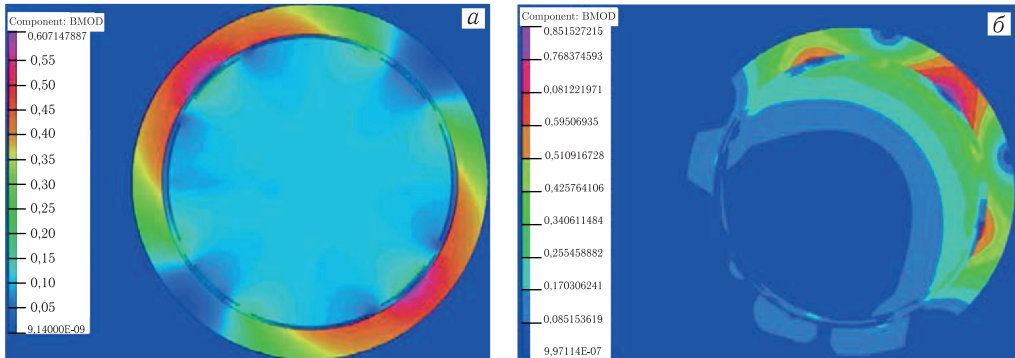


Рис. 4. Расчет величины магнитной индукции B_{mod} в корректорах бустера (2D МКЭ): дипольном (а) и мультипольном (б)

Результаты расчетов на радиусе $R = 30$ мм для корректирующих магнитов бустера и коллайдера приведены в табл. 2. Разница между результатами аналитического и численного расчета определяется как

$$\delta = \left| \frac{B_{\text{FEM}} - B_{\text{analytic}}}{B_{\text{FEM}}} \right| \cdot 100 \%,$$

где B_{FEM} — результат численного расчета; B_{analytic} — результат аналитического расчета. Как видно, разница в результатах менее 1% (кроме дипольного поля), что может быть обусловлено рядом причин: подавление гармоник B_2 не учтено в аналитической модели, при расчете МКЭ использована сетка с точностью 10^{-5} .

Таблица 2. Расчет магнитного поля на $R = 30$ мм (в Тл) (бустер/коллайдер)

| Расчет | Диполь (B_0, A_0) | Квадруполь (A_1) | Секступоль (B_2, A_2) | Октуполь (B_3) |
|-----------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|---|
| Модель (вакуум) | 0,03857/0,07890 | 0,01676/0,05169 | $7,413 \cdot 10^{-3}/0,01427$ | $2,007 \cdot 10^{-3}/3,569 \cdot 10^{-3}$ |
| МКЭ (вакуум) | 0,03486/0,07736 | 0,01661/0,05151 | $7,451 \cdot 10^{-3}/0,01421$ | $2,010 \cdot 10^{-3}/3,628 \cdot 10^{-3}$ |
| δ | 10,51/2,00 | 0,91/0,35 | 0,50/0,42 | 0,17/1,65 |
| Модель (ядро) | 0,07204/0,14527 | 0,03239/0,09051 | 0,01342/0,02506 | $3,321 \cdot 10^{-3}/5,834 \cdot 10^{-3}$ |
| МКЭ (ядро) | 0,07334/0,14293 | 0,03232/0,09005 | 0,01336/0,02529 | $3,313 \cdot 10^{-3}/5,806 \cdot 10^{-3}$ |
| δ | 1,78/1,63 | 0,21/0,51 | 0,42/0,92 | 0,17/0,49 |

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Для мультипольных корректоров бустера выполнены магнитные измерения (МИ). Датчик Холла размещается на наружной поверхности вала ($\approx R = 41$ мм) с измерительными катушками (рис. 5) [7] только со стороны фокусирующей линзы, в результате чего выполнены МИ лишь четырех из восьми мультипольных корректоров бустера.

Зависимости величины радиальной компоненты магнитного поля от угла $B_r(\theta)$ по результатам МИ и при расчете МКЭ приведены на рис. 6. Как видно, наблюдается корреляция между расчетными и измеренными данными. При МИ использовалось отличное от моделирования питание обмоток (последовательное подключение обмоток с током 82 А). В дальнейшем планируется выполнить моделирование с учетом всех источников систематических ошибок и сравнить результаты с МИ.

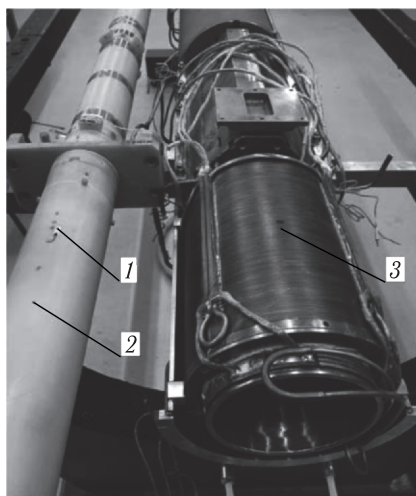


Рис. 5. Система МИ: 1 — датчик Холла; 2 — вал с измерительными катушками; 3 — магнит

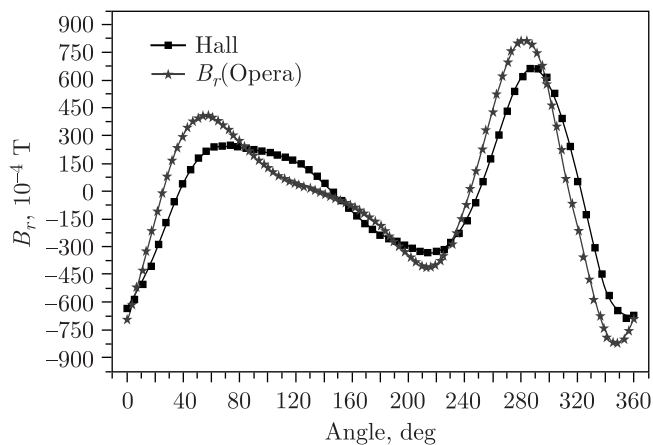


Рис. 6. Зависимость радиальной компоненты магнитного поля от углового положения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На текущий момент закончены разработка и изготовление корректирующих магнитов бустера. Выполнены двумерные аналитический и численный расчеты магнитных полей в центре магнита. Разница в результатах (за исключением дипольных обмоток) составила менее 1%. Кроме того, планируется выполнить трехмерные аналитические и численные моделирования. Магнитные измерения датчиком Холла были проведены для половины корректоров бустера. Опыт, полученный при производстве корректоров бустера, был учтен при разработке конструкции и технологии изготовления корректирующих магнитов коллайдера, серийное производство которых начато в ОИЯИ.

Благодарности. Авторы выражают благодарность всем, кто оказывает поддержку испытаний в ОИЯИ, в особенности сотрудникам НЭОСМТ ЛФВЭ, а также Анне Богомоловой за корректуру английской версии статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kazinova O. et al.* Simulation of Closed Orbit Correction for the Nuclotron Booster // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2018. V. 15, No. 7. P. 854–857; <https://doi.org/10.1134/S1547477118070051>.
2. *Syresin E. et al.* Status of Accelerator Complex NICA // *Proc. of the 26th Russ. Particle Accelerator Conf. (RUPAC'18)*, Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. Geneva: JACoW Publ., 2018. P. 12–16; <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-МОХМН03>; <http://jacow.org/rupac2018/papers/moxmh03.pdf>.
3. *Khodzhbagiyani H. et al.* Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Collider Complex // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2014. V. 24, No. 3. P. 1–4.
4. *Tuzikov A. et al.* Booster Synchrotron at NICA Accelerator Complex // *Proc. of the 25th Russ. Particle Accelerator Conf. (RuPAC'16)*, St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. Geneva: JACoW, 2017. P. 160–162; doi:10.18429/JACoW-RuPAC2016-FRCAMH05; <http://jacow.org/rupac2016/papers/frcamh05.pdf>.
5. *Jackson J.D.* *Classical Electrodynamics*. 3rd ed. New York, NY: Wiley, 1999; <http://cdsweb.cern.ch/record/490457>.
6. *Russenschuck S.* *Field Computation for Accelerator Magnets: Analytical and Numerical Methods for Electromagnetic Design and Optimization*. Weinheim: Wiley-VCH. 2010. <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-3527407693.html>.
7. *Parfjylo T.A. et al.* Magnetic Measurements of the Multipole Correctors of the NICA Booster // *Proc. of the 26th Russ. Particle Accelerator Conf. (RUPAC'18)*, Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. JACoW Publ., 2018. P. 346–348; <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEPSB31>; <http://jacow.org/rupac2018/papers/wepsb31.pdf>.