

СОСТОЯНИЕ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДВУХАПЕРТУРНЫХ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ КОЛЛАЙДЕРА

*М. М. Шандов¹, В. В. Борисов, А. В. Бычков, О. М. Голубицкий,
И. И. Донгузов, А. М. Донягин, Д. А. Золотых, М. А. Кашунин,
С. А. Костромин, В. А. Михайленко, Т. А. Парфило,
Г. Г. Ходжибагиян, А. В. Шемчук*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Оптическая структура комплекса NICA включает 80 двухапертурных дипольных магнитов. Параметры магнитного поля необходимо измерить в каждой апертуре каждого магнита. На сегодня 25% всех магнитов успешно выдержали испытания. В статье представлены прогресс магнитных измерений и результаты измерений при гелиевой температуре.

The lattice of the NICA collider includes 80 twin-aperture superconducting dipole magnets. Measurements of the magnetic field parameters should be done for both apertures of each collider magnet. For the time being 25% of the magnets successfully passed the tests. This paper describes the state of serial magnetic measurements and results of test at helium temperature.

PACS: 07.55.Ge; 84.71.Ba; 41.85.Lc

ВВЕДЕНИЕ

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) — новый ускорительно-накопительный комплекс, сооружаемый в ОИЯИ для изучения свойств барионной материи высокой плотности [1]. Оптическая структура коллайдера включает 80 двухапертурных сверхпроводящих дипольных магнитов [2]. Коллайдер предназначен для работы при рабочих энергиях 1,0, 3,0 и 4,5 ГэВ/нуклон, которым соответствуют рабочие поля дипольных магнитов 0,4, 1,2 и 1,8 Тл соответственно. Серийное производство этих магнитов начато в ОИЯИ [3], и в настоящее время 25% данных магнитов прошли испытания. Согласно техническому заданию необходимо измерить следующие параметры магнитов:

- поле в центре магнита;
- эффективную длину магнита и относительный разброс:

$$L_{\text{eff}} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} B_y ds}{B_y(0)}, \quad \delta L_{\text{eff}} = \frac{\Delta L_{\text{eff}}}{\langle L_{\text{eff}} \rangle};$$

¹E-mail: shandov@jinr.ru

— направление магнитного поля (дипольный угол) — угол между средними плоскостями магнитного поля и железного ярма:

$$\alpha_1 = -\arctg(A_1^*/B_1^*);$$

— ошибки поля на $R = 30$ мм;

— интегральные значения относительных гармоник поля до седьмой.

Магнитные измерения (МИ) проводятся при температуре окружающей среды и рабочем токе 100 А («теплые» измерения), а также при рабочей температуре 4,5 К и рабочем токе 10,8 кА («холодные» измерения).

СИСТЕМА МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Процедура МИ основана на методе вращающихся катушек [3–5]. Магнитометрическая система (ММС) (рис. 1) включает три одинаковые секции (1), собранные на ложементе (2), который, в свою очередь, устанавливается в измерительный вал (3). Каждая секция представляет собой набор из трех измерительных катушек, выполненных в виде печатных плат. Каждая катушка состоит из 20 слоев, каждый слой включает 20 витков, всего в одной катушке 400 витков. Кроме того, в центре датчика установлены датчик Холла и ЯМР. В настоящее время 4 ММС используется для всех типов МИ.

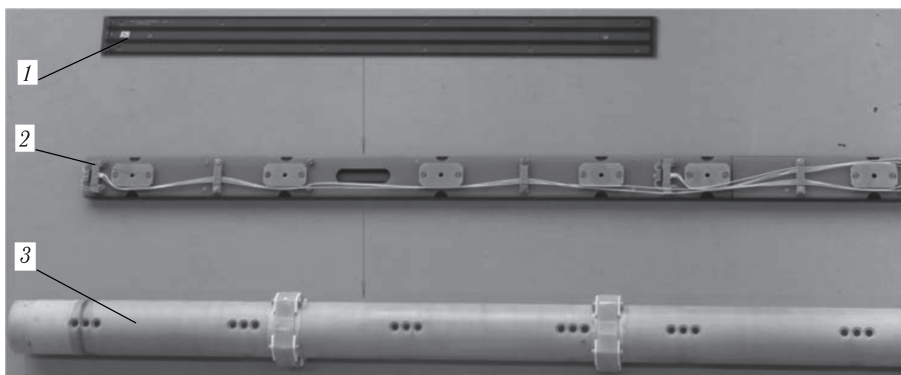


Рис. 1. Магнитометр: 1 — секция измерительных катушек; 2 — ложемент; 3 — измерительный вал

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты МИ предсерийного и прототипа серийного магнитов приведены в [3, 6]. Один цикл магнитных измерений включает: МИ «реперного» поля (определение начальной фазы измерений), измерение основного поля (измерение поля в центре и эффективной длины магнита) и измерение скомпенсированного (используется аналоговая компенсация) поля (измерение относительных гармоник поля) в направлении по и против часовой стрелки. Эффективная длина магнита определяется как [7]

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{B_1(0)} \left[\sum_{i=1}^3 B_{1,i} \delta_i \right],$$

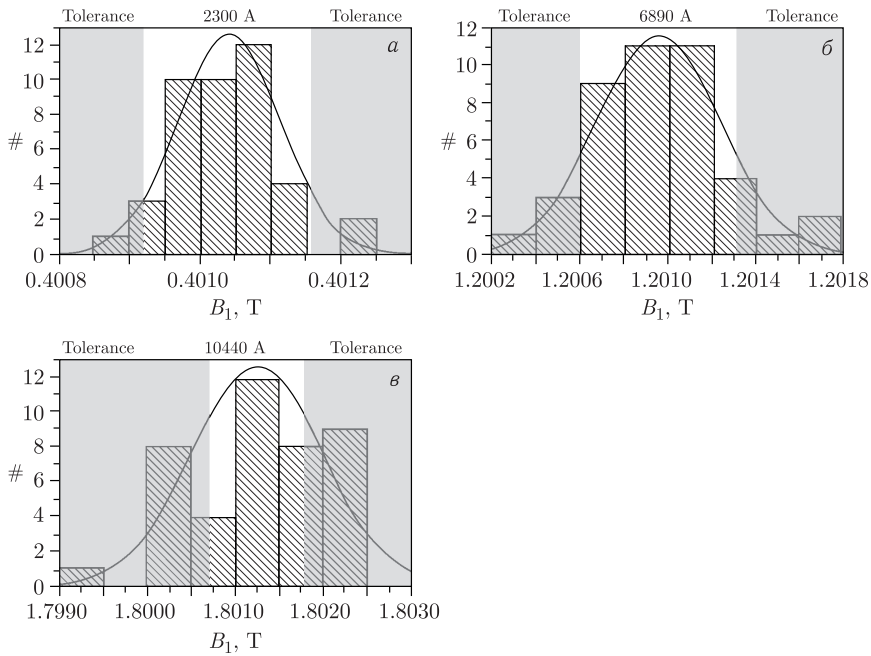


Рис. 2. Распределение величины магнитного поля при рабочих токах 2,3 кА (а), 6,89 кА (б) и 10,44 кА (в)

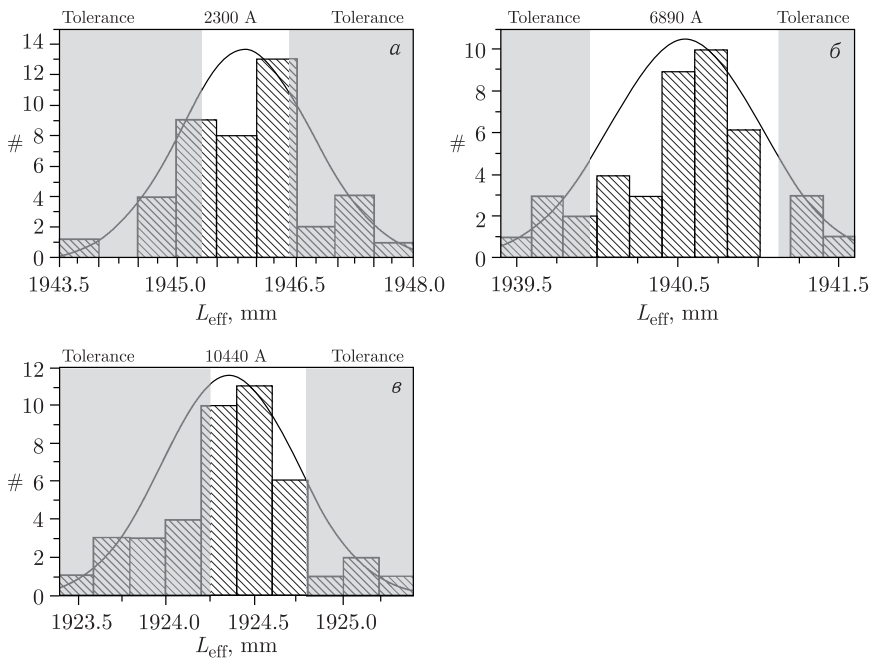


Рис. 3. Распределение эффективных длин при рабочих токах 2,3 кА (а), 6,89 кА (б) и 10,44 кА (в)

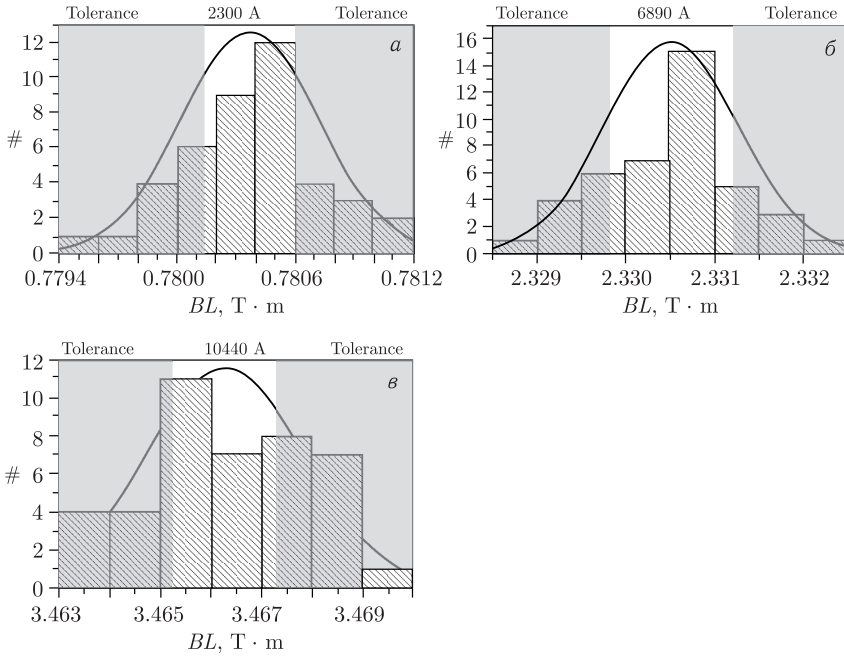


Рис. 4. Распределение интегралов магнитного поля при рабочих токах 2,3 кА (а), 6,89 кА (б) и 10,44 кА (в)

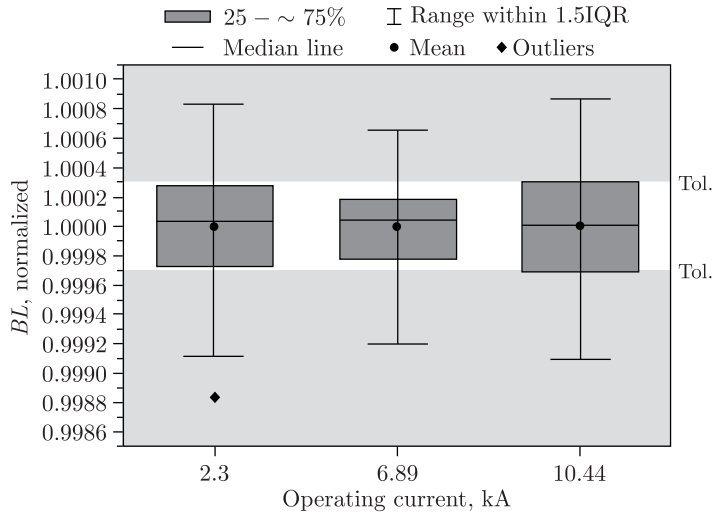


Рис. 5. Зависимость нормализованной величины интеграла магнитного поля от рабочего тока

где i — номер секции; $B_{1,i}$ — величина основной (дипольной) гармоники поля, измеренная i -й секцией; s_i — длина интегрирования i -й секции; $B_1(0) = B_{1,2}$. Секции 1 и 3 измеряют область краевых полей $s_1 = s_3 = l_{coil}$. Секция 2 измеряет поле в центральной части магнита, а длина интегрирования (s_2) включает зазор между катушками 1 и 3.

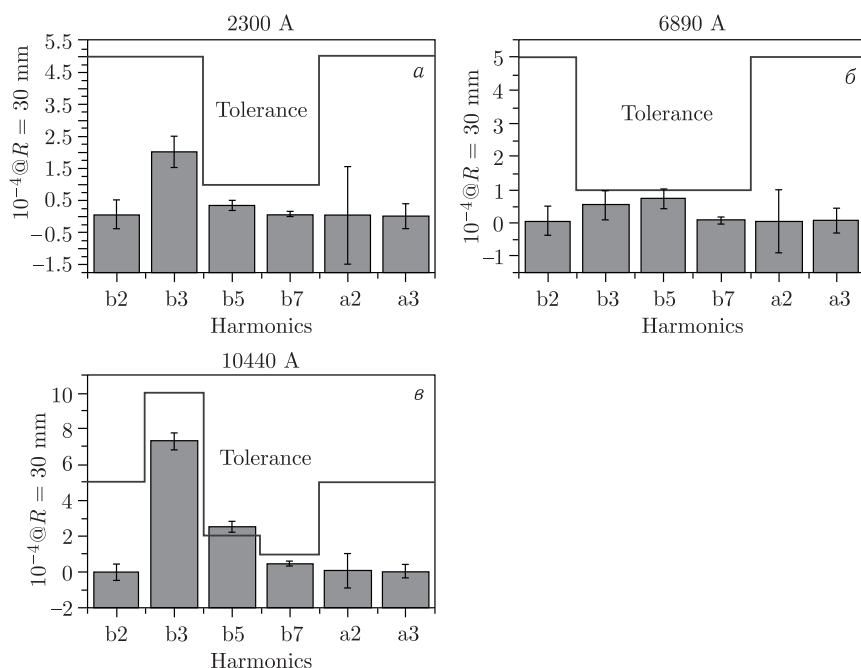


Рис. 6. Величины интегральных значений относительных гармоник при рабочих токах 2,3 кА (а), 6,89 кА (б) и 10,44 кА (в)

Распределения основных параметров магнитного поля (поле в центре магнита, эффективная длина магнита и интегральная величина магнитного поля) при рабочих токах (2,3, 6,89 и 10,44 кА) приведены на рис. 2–4 соответственно. Как видно, некоторые параметры превышают величину допуска, что может быть связано с отсутствием процедуры калибровки ММС.

Основным параметром дипольных магнитов является интегральная величина магнитного поля. Для оценки зависимости основных статистических параметров (среднего значения, медианы, стандартного отклонения и т. д.) от рабочего тока на рис. 5 представлена диаграмма размаха нормализованной величины интеграла магнитного поля.

Качество магнитного поля может определяться интегральными величинами относительных гармоник (рис. 6). Поскольку «разрешенные» гармоники (b_3 , b_5 , b_7) имеют зависимость от рабочего тока, допуск на эти величины также различен для различных рабочих токов. Кроме того, для удобства оценки показаны абсолютные величины. «Разрешенная» гармоника b_5 превышает допустимое значение при рабочем токе 10,44 кА, что необходимо учитывать в будущем при моделировании динамики пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Завершена разработка и производство первых четырех серийных ММС для дипольных магнитов коллайдера. В настоящее время две ММС используются для одновременных «холодных» измерений в каждой апертуре магнита. Еще две ММС нахо-

дятся в стадии производства. При разработке серийных ММС был учтен опыт разработки и эксплуатации ММС для предсерийных измерений. Представлены первые результаты МИ и распределения основных параметров магнитов. Для более детального анализа полученных результатов в дальнейшем необходимо проведение калибровки (как минимум относительной) для всех ММС. Ведутся разработка и производство ММС для квадрупольных линз коллайдера NICA, серийное производство и испытания которых начаты в ОИЯИ.

Благодарности. Авторы выражают благодарность всем, кто оказывает поддержку испытаний в ОИЯИ, в особенности сотрудникам НЭОСМТ ЛФВЭ, Михаилу Омеляненко за разработку маломощного источника питания для «теплых» МИ и Анне Богомоловой за корректуру английской версии статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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-MOXMH03>; <http://jacow.org/rupac2018/papers/moxmh03.pdf>.
2. Khodzhbagiyan H. et al. Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Collider Complex // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2014. V. 24, No. 3. P. 1–4.
3. Shandov M. et al. The Present Status of the Magnetic Measurements of the NICA Collider Twin-Aperture Dipoles // Proc. of the 26th Russ. Particle Accelerator Conf. (RUPAC'18), Protvino, Russia, Oct. 1–5, 2018. Geneva: JACoW Publ., 2018. P. 349–352; <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-WEPSB32>; <http://jacow.org/rupac2018/papers/wepsb32.pdf>.
4. Shandov M. M. et al. Magnetic Measurements of Preproduction Twin-Aperture Dipole Magnets for the NICA Collider // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 7. P. 863–872; <https://doi.org/10.1134/S1547477118070622>.
5. Shandov M. et al. Magnetic Measurement System for the NICA Collider Dual Dipoles // Proc. of Russ. Particle Accelerator Conf. (RuPAC'16), St. Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. Geneva: JACoW Publ., 2017. P. 547–549; doi:10.18429/JACoW-RuPAC2016-THPSC005; <http://jacow.org/rupac2016/papers/thpsc005.pdf>.
6. Shandov M. et al. First Serial Magnetic Measurements of the NICA Collider Twin-Aperture Dipoles // Proc. of the 9th Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC'18), Vancouver, BC, Canada, April 29 – May 4, 2018. Geneva: JACoW Publ., 2018. P. 3645–3648; <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAL013>; <http://jacow.org/ipac2018/papers/thpal013.pdf>.
7. Kostromin S. A. et al. Measurement of the Magnetic-Field Parameters of the NICA Booster Dipole Magnet // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 7. P. 855–861; <https://doi.org/10.1134/S1547477116070323>.