

## Измерение магнитных характеристик элементов бустерного синхротрона комплекса NICA

А. М. Донягин, В. В. Борисов, О. Казинова, С. А. Костромин

*В ОИЯИ (Дубна) начаты серийные испытания дипольных и квадрупольных магнитов бустерного синхротрона комплекса NICA. Ускоритель состоит из магнитов типа «Нуклотрон», в которых используются сверхпроводящая обмотка и железное ярмо. В процессе сборки и испытаний каждого модуля магнитно-криостатной системы бустера предполагается проведение измерений характеристик поля каждого магнита. В работе описана измерительная система, приводятся результаты магнитных измерений дипольных магнитов бустера NICA по статистике на май 2017 г.*

*Ключевые слова:* синхротрон, сверхпроводимость, магнит, измерение, катушка, поле, поток, гармоника, допуск.

### Введение

Ускорительный комплекс NICA [1], сооружаемый в ОИЯИ (г. Дубна Московской области), состоит из двух инжекционных цепочек на базе линейных ускорителей, бустерного синхротрона (бустер), существующего синхротрона «Нуклотрон» и накопительного кольца – коллайдера. Весь комплекс NICA (англ. Nuclotron-based Ion Collider fAcility) предназначен для проведения физических экспериментов по изучению поведения барионной материи высокой плотности.

Основой бустера и коллайдера NICA являются сверхпроводящие (СП) магниты с железным ярмом [2]. Они аналогичны по конструкции магнитам «Нуклотрона» [3].

Целью данной работы является описание используемой магнитометрической системы и представление результатов магнитных измерений дипольных магнитов бустера NICA по статистике на май 2017 года.

---

Донягин Алексей Михайлович, ведущий инженер.  
 Борисов Владимир Владимирович, начальник группы.  
 Казинова Ольга, инженер.  
 Костромин Сергей Александрович, начальник отдела, д.ф.-м.н.  
 Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ).  
 Россия, 141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.  
 Тел.: (7-09621) 62-190, (7-09621) 62-536.  
 E-mail: kostromin@jinr.ru; donyagin@lhe.jinr.ru;  
 kazinova.olga@gmail.com

Статья поступила в редакцию 5 мая 2017 г.

---

© Донягин А. М., Борисов В. В., Казинова О., Костромин С. А., 2017

### Программа тестов

Программа тестов включает измерения параметров магнитного поля как при температуре окружающей среды, так и при рабочей температуре магнита 4,5 К.

Задачи данных измерений:

- определить основные параметры поля структурных магнитов ускорителя, влияющие на динамику пучка;
- подтвердить, что характеристики поля структурных магнитов находятся в допусках, обеспечивающих работу бустерного ускорителя с проектными параметрами;
- определить параметры, позволяющие выполнить юстировку с заданной точностью структурных магнитов в кольце ускорителя.

Для проведения магнитных измерений была разработана и построена специальная система [4]. Далее приводится описание созданной системы, а также методики определения основных параметров поля дипольных магнитов бустера. Представлены также результаты серийных измерений.

### Дипольный магнит бустера NICA

Параметры дипольного магнита ускорителя приведены в [2]. Этот магнит имеет кривизну (её радиус составляет 14,09 м). Данная особенность определяет методику магнитных измерений и конструкцию соответствующей магнитометрической системы (ММС). Максимальная величина индукции поля в магнитах составляет 1,8 Тл. При работе магнита обмотка и ярмо охлаждаются по-

током двухфазного гелия. Обмотка магнита сделана из трубчатого СП-кабеля на основе сплава NbTi. Величина рабочего тока составляет  $\approx 9,68$  кА. В номинальном цикле работы бустера предусмотрено линейное нарастание и спад магнитного поля со скоростью 1,2 Тл/с. Ядро магнита состоит из двух симметричных частей, т.н. полуярем, скрепляемых вместе при помощи болтов. Полуярма изготовлены из пластин изотропной электротехнической стали толщиной 0,65 мм. Длина дипольного магнита 2200 мм.

### Точность определения параметров магнитного поля

В соответствии с техническим заданием для дипольных магнитов бустера необходимо определить следующие параметры:

1) отклонение эффективной длины данного магнита от её среднего значения (определенного по статистике из всех магнитов);

2) качество магнитного поля в зависимости от величины тока возбуждения магнита, а именно: относительные гармоники поля до 5-й гармоники включительно для значений тока, соответствующих полю инжекции  $\sim 0,117$  Тл, максимальному полю 1,8 Тл, а также 5–7 промежуточным значениям;

3) угол между магнитной и геометрической медианными плоскостями.

Допуски на параметры магнитного поля, обеспечивающие возможность достижения проектных параметров ускорителя, сформулированы в работе [5] на основе расчетов динамики пучка и оценки динамической апертуры. Основные допуски приведены в таблице.

Таблица

Допуски на параметры дипольных магнитов при токе, соответствующему  $B_{ref} = 1,8$  Тл

Параметр	Значение	Точность определения
Относительный разброс эффективных длин	$\pm 5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
Угол поворота медианной плоскости вокруг продольной оси элемента	$\pm 0,5$ мрад	0,1 мрад
$b_1$ (главное поле)	1	$10^{-4}$
$a_1$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
$b_2$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
$a_2$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
$b_3$	$10 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
$a_3$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
$b_5$	$10^{-4}$	$10^{-4}$
$a_5$	$10^{-4}$	$10^{-4}$

Примечание: величины относительных гармоник магнитного поля  $b_n, a_n$  указаны в относительных единицах к главному полю –  $b_1$  и определены для радиуса  $r_{ref} = 30$  мм.

### Система магнитных измерений

Для измерения магнитных характеристик структурных элементов комплекса NICA выбрана общепринятая методика вращающихся катушек, применяемая для измерения интегральных характеристик магнитного поля с осевой симметрией [6–9]. Магнитометрическая система (ММС) состоит из датчика с вращающимися катушками, расположенными в общем ложементе, и системы сбора данных, которая собрана на основе оборудования National Instruments PXI. Управление сбором данных работает в среде LabView. Трехмерная модель ММС представлена на рис. 1.

Радиус кривизны дипольного магнита бустера составляет  $\sim 14$  м, т. е. его магнитное поле не имеет осевой симметрии. Ввиду этого измерительный датчик проектировался, исходя из представления данного магнита как суммы коротких магнитов, расположенных под углом друг к другу.

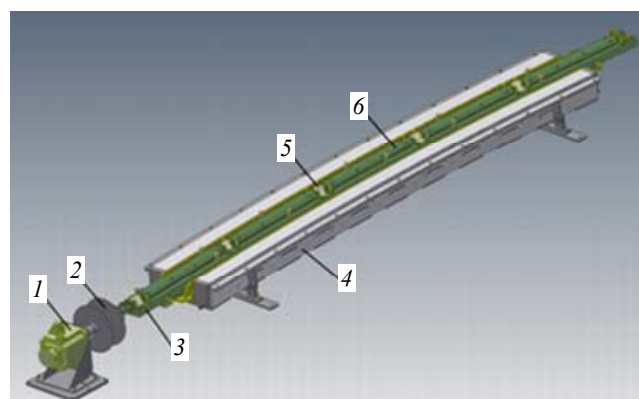


Рис. 1. Трехмерная модель ММС: 1 – сервомотор, 2 – катушка для кабеля измерительных сигналов, 3 – ложемент датчика, 4 – нижнее полуядро магнита, 5 – сильфонное соединение между измерительными секциями, 6 – измерительная секция.

Поэтому датчик состоит из нескольких относительно коротких (а именно, пяти) прямолинейных

секций (рис. 1), которые далее обозначаются  $A, B, C, D, E$ . Внутри каждой измерительной секции находятся три радиальные измерительные катушки.

Дополнительно в общем ложементе датчика предусмотрен виток шириной около 60 мм, покрывающий всю область существования магнитного поля в продольном направлении, который можно рассматривать как еще один способ измерения эффективной длины магнита.

Гармонические катушки изготовлены по технологии многослойных печатных плат. Каждая плата (секция) включает в себя три одинаковые радиальные катушки, при этом плата состоит из 20-ти слоев с 20 витками в каждом слое, так что общее число витков в каждой катушке равно 400.

Привязка системы координат измерительного датчика осуществляется за счет использования ярма магнита, выполненного с высокой механической точностью, и конструкции ложеента, в котором расположены опоры подшипников. Определение углового положения каждой измерительной секции относительно механической средней плоскости магнита осуществляется с помощью дополнительной обмотки, состоящей из двух витков, расположенных в углах апертуры магнита (см. рис. 2). Данная обмотка создает дипольное поле, направленное параллельно геометрической средней плоскости магнита.

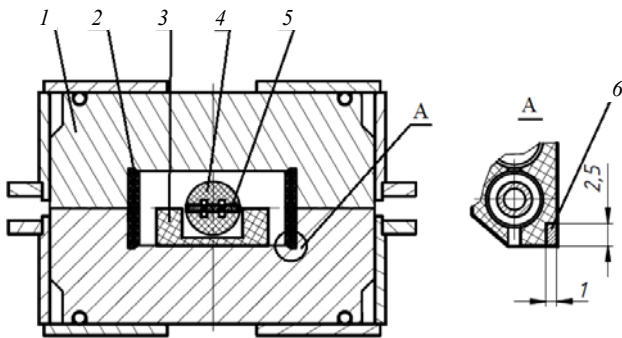


Рис. 2. Сечение дипольного магнита с датчиком ММС: 1 – железное ярмо, 2 – обмотка, 3 – ложемент датчика магнитометрической системы, 4 – корпус датчика, 5 – измерительные гармонические катушки, 6 – реперная обмотка.

Выбор такого конструкторского решения обусловлен следующими причинами:

- измерения проводятся в апертуре магнита при криогенных температурах ( $\approx 4,5$  К) и в условиях вакуума ( $\approx 10^{-5}$  Па), что делает применение механических и прочих измерительных приборов для юстировки положения датчика относительно ярма магнита крайне затруднительным;
- в рамках проекта предстоят также измерения параметров поля дипольных магнитов и линз, имеющих осевую симметрию, для которых однозначно тоже будет применяться метод вра-

щающихся катушек, т. е. будут использованы части данной ММС.

### Последовательность измерений

Измерения состоят в определении потока вектора индукции магнитного поля через катушку путем интегрирования наведенной в ней ЭДС по времени и повторяются на разных этапах пошагово с разным угловым положением катушек (вращение производится вдоль продольной оси магнита).

Последовательность измерений состоит из трех этапов, представленных ниже.

1) Измерения *реперного* поля от обмотки, которая находится в углах апертуры магнита (ток возбуждения магнита  $\approx 100$  А), для определения азимутального расположения измерительных секций  $\Phi_{rep\_A}, \Phi_{rep\_B}, \Phi_{rep\_C}, \Phi_{rep\_D}, \Phi_{rep\_E}$  относительно геометрической средней плоскости магнита.

2) Измерения *основного* поля – измеряется прямой сигнал с катушек от основной обмотки для определения амплитуд  $C_{1\_A}, C_{1\_B}, C_{1\_C}, C_{1\_D}, C_{1\_E}$  и фаз  $\phi_{1\_A}, \phi_{1\_B}, \phi_{1\_C}, \phi_{1\_D}, \phi_{1\_E}$  основной, т.е. дипольной компоненты магнитного поля (ток – до 10 кА).

3) Измерения в *режиме компенсации*: с помощью специальной коммутации катушек происходит вычитание сигналов от основного поля. Режим применяется для подавления сигнала от основной – дипольной – составляющей магнитного поля при измерении более высоких гармоник поля, которые по порядку величины составляют  $10^{-4}$  от дипольной компоненты (ток – до 10 кА). Результат – амплитуды и фазы гармоник магнитного поля выше первой, массив которых можно представить следующим образом:

$$C_{n\_A}, C_{n\_B}, C_{n\_C}, C_{n\_D}, C_{n\_E}$$

$$\Phi_{n\_A}, \Phi_{n\_B}, \Phi_{n\_C}, \Phi_{n\_D}, \Phi_{n\_E}$$

$$n = 2, \dots, 7.$$

Во время выполнения каждого из трех этапов измерения делаются пошагово в 65-ти угловых положениях измерительных катушек (последняя точка – это возврат в начальное положение, для расчета не используется). Поворот катушек между точками осуществляется сервомотором, управляемым с компьютера и обеспечивающим точность углового позиционирования катушек на уровне  $10^{-2}$  градуса.

В каждом угловом положении измерительных катушек выполняется следующая последовательность действий:

1) генерируется управляющий источником питания (ИП) сигнал, задающий форму и амплитуду тока – импульс, который представляет собой треугольный сигнал с ЦАП, состоящий из  $\sim 2 \times 10^5$  точек, ИП подает ток на магнит;

2) ИП формирует и подает импульс тока на магнит в соответствии с управляющим сигналом;

3) АЦП синхронно оцифровывает соответствующие сигналы (напряжение) с каждой из пяти гармонических катушек и датчика тока ( $\sim 2 \times 10^5$  отсчетов);

4) производится запись полученных данных на жесткий носитель (в итоге в файле получаем 65 кластеров, в каждом из которых по 6 массивов данных: 1-й – с тока, 2-й – 6-й – с пяти катушек);

5) при помощи сервомотора выполняется поворот измерительных катушек магнитометра на угол  $\Delta\theta = 2 \times \pi / N$  ( $N = 64$ ), и действия повторяются, начиная с пункта 1.

В итоге для каждого дипольного магнита производится 3 этапа измерений: 1) измерения реперного поля, 2) измерения основного поля, 3) измерения в режиме компенсации основной компоненты. Данный цикл из трех этапов повторяется 5 раз для набора статистики для каждого магнита.

### Обработка сигналов

Магнитный поток через катушку в момент времени  $t_i$ , соответствующий значению тока  $I_i$ , определяется по формуле:

$$\Phi(t_i) = \Phi(t_0) - \int_{t_0}^{t_i} \varepsilon dt$$

где  $\varepsilon$  – мгновенное значение ЭДС в катушке, а  $\Phi(t_0)$  – поток через катушку в начальный момент времени  $t_0$  (далее предполагается равным нулю), при этом значение  $|t_i - t_0|$  кратно  $\frac{n}{f_0}$ , где  $f_0 = 50$  Гц – частота тока в промышленных силовых цепях.

Интеграл  $\int_{t_0}^{t_i} \varepsilon dt$  вычисляется численно, например, методом трапеций:

$$\int_{t_0}^{t_i} \varepsilon dt = \sum_i U_i \Delta t_i.$$

Таким образом, для всех 5-ти измерительных секций  $A, B, C, D, E$ , для любой величины тока  $I$  (от 0 до  $I_{\max}$ ) получаем 64 значения потока  $\Phi_i$  (для каждого углового положения  $\{\theta_i\}$ ).

### Математическая обработка

1. Для заданного значения тока  $I$  из 64-х измеренных значений магнитного потока  $\Phi_i$  вы-

числяются коэффициенты ряда Фурье (поточковые гармоники) для каждой секции  $A, B, C, D, E$ :

$$B_n = -\frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \Phi_i \cos \frac{2\pi n}{N}$$

$$A_n = -\frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \Phi_i \sin \frac{2\pi n}{N}.$$

2. Из коэффициентов ряда Фурье для потоков (поточковых гармоник) вычисляются гармоники магнитного поля для каждой секции  $A, B, C, D, E$ :

$$a_n = \frac{-A_n n}{L_{coil} N_{turns} R_{ref} \left[ \left( \frac{R_2}{R_{ref}} \right)^n - \left( \frac{R_1}{R_{ref}} \right)^n \right]}$$

$$b_n = \frac{B_n n}{L_{coil} N_{turns} R_{ref} \left[ \left( \frac{R_2}{R_{ref}} \right)^n - \left( \frac{R_1}{R_{ref}} \right)^n \right]}$$

где  $R_{ref}$  – радиус приведения данных (30 мм).

3. Используя данные, полученные при измерении реперного поля, вычисляются фазы основной компоненты этого поля  $\Phi_{rep\_A}, \Phi_{rep\_B}, \Phi_{rep\_C}, \Phi_{rep\_D}, \Phi_{rep\_E}$ :

$$\Phi_{rep\_i} = \arctan \frac{a_{1\_rep\_i}}{b_{1\_rep\_i}},$$

$$\Phi_{rep\_i} \in \left[ -\frac{\pi}{2}; +\frac{\pi}{2} \right], \quad i = A, B, C, D, E.$$

4. Используя данные, полученные при измерении основного поля магнита, вычисляются амплитуды и фазы дипольной компоненты

$$C_{1\_A}, C_{1\_B}, C_{1\_C}, C_{1\_D}, C_{1\_E},$$

$$\Phi_{1\_A}, \Phi_{1\_B}, \Phi_{1\_C}, \Phi_{1\_D}, \Phi_{1\_E}.$$

по формулам

$$C_{1\_i} = \sqrt{a_{1\_i}^2 + b_{1\_i}^2}, \quad \Phi_{1\_i} = \arctan \frac{a_{1\_i}}{b_{1\_i}},$$

$$\Phi_{1\_i} \in \left[ -\frac{\pi}{2}; +\frac{\pi}{2} \right], \quad i = A, B, C, D, E.$$

5. Считая, что поле реперной обмотки направленно параллельно средней плоскости яра дипольного магнита, вычисляются истинные фазы основной компоненты поля с учетом фаз (углов) каждой из измерительных секций относительно средней плоскости в момент начала вращения дат-

чика. При этом предполагается, что средняя секция  $C$  была выставлена в «нуль» в начале вращения:

$$a_{1\_A} = \varphi_{1\_A} - \varphi_{rep\_A} - \varphi_{rep\_C} + 90^\circ$$

$$a_{1\_B} = \varphi_{1\_B} - \varphi_{rep\_B} - \varphi_{rep\_C} + 90^\circ$$

$$a_{1\_C} = \varphi_{1\_C} - \varphi_{rep\_C} + 90^\circ$$

$$a_{1\_D} = \varphi_{1\_C} + \varphi_{rep\_D} - \varphi_{rep\_C} + 90^\circ$$

$$a_{1\_E} = \varphi_{1\_E} + \varphi_{rep\_A} - \varphi_{rep\_C} + 90^\circ.$$

Аналогично определяются истинные фазы гармоник магнитного поля порядка выше первого.

6. Зная истинные значения фаз гармоник магнитного поля, вычисляются  $\{a_{n\_i}\}$ ,  $\{b_{n\_i}\}$ :

$$a_{n\_i} = C_{n\_i} \times (-\sin(n\alpha_{n\_i}))$$

$$b_{n\_i} = C_{n\_i} \times \cos(n\alpha_{ni}), \quad i = A, B, C, D, E; \quad n = 2, \dots, 7.$$

7. Из гармоник  $\{a_{n\_i}\}$ ,  $\{b_{n\_i}\}$  для каждой секции вычисляются *интегральные гармоники*  $\{a_n\}$ ,  $\{b_n\}$  (см. рис. 3):

$$a_n = a_{n\_A} + K \times (a_{n\_B} + a_{n\_C} + a_{n\_D}) + a_{n\_E},$$

$$b_n = b_{n\_A} + K \times (b_{n\_B} + b_{n\_C} + b_{n\_D}) + b_{n\_E},$$

$$K = \frac{3 \times l_k + 4 \times \Delta l}{3 \times l_c}.$$

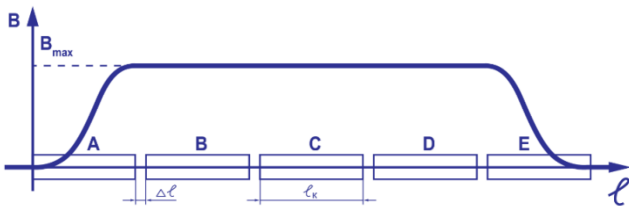


Рис. 3. Схематический вид секций с измерительными катушками относительно профиля основной компоненты магнитного поля.  $l_k$  – длина измерительной катушки,  $\Delta l$  – расстояние между катушками.

8. Соответственно, эффективная длина вычисляется по формуле:

$$L_{eff} = \frac{(b_{1\_A} + b_{1\_E}) \times l_k + K \times (b_{1\_B} + b_{1\_C} + b_{1\_D}) \times l_k}{b_{1\_C}}.$$

Для криогенных измерений эффективная длина умножается на коэффициент теплового сжатия стеклотекстолита печатной платы, определенного при температуре магнитометрического датчика при начале магнитных измерений.

## Практические результаты

К концу мая 2017 года выполнены измерения характеристик магнитного поля для 13-ти дипольных магнитов Бустера. Распределение относительного разброса эффективных длин магнитов для максимального рабочего значения поля 1,8 Тл показано на рис. 4. Среднеквадратичный разброс относительных отклонений эффективных длин от среднего значения составляет  $2,9 \times 10^{-4}$ , что находится в соответствии с допуском на данную величину.

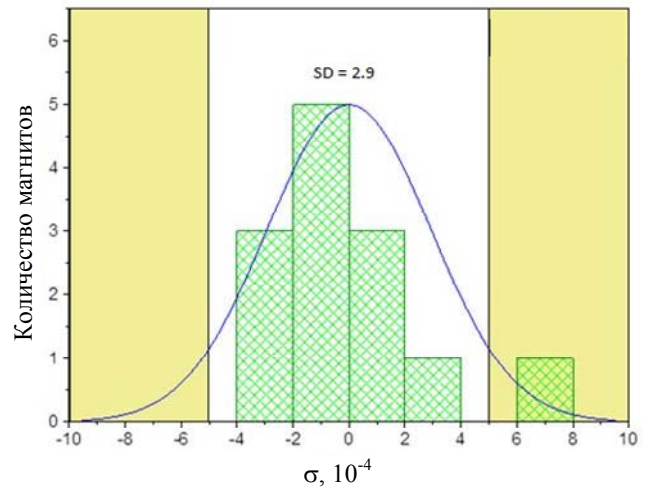


Рис. 4. Распределение относительного разброса эффективных длин дипольных магнитов бустера NICA (статистика – 13 магнитов).

## Заключение

В работе описана система измерения магнитного поля для дипольных магнитов бустерного синхротрона комплекса NICA. Для измерений используется методика вращающихся катушек. Датчик системы состоит из 5-ти прямых секций длиной в несколько сотен миллиметров, соединенных на одном валу с помощью сильфонов. Выбранная конструкция позволяет измерять характеристики изогнутых магнитов бустера с относительной точностью лучше, чем  $10^{-4}$ , причем при криогенных температурах.

С помощью созданной системы начаты серийные магнитные измерения структурных элементов бустера. По статистике из 13-ти дипольных магнитов относительный разброс эффективных длин составляет  $2,9 \times 10^{-4}$ , что находится в соответствии с допуском на данную величину.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kekelidze V., Sorin A., Trubnikov G. et al. // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9. № 4–5 (174–175). С. 521.

2. Khodzhbagiyan H., Meshkov I., Trubnikov G. et al. // IEEE Trans. Appl.Supercond. 2014. Vol. 24. No. 3, P. 4001304.
3. Khodzhbagiyan H., Smirnov A. The concept of a superconducting magnet system for the Nuclotron - 1988. / Proc. of ICIC12, Southampton. P. 841.
4. Borisov V., Donyagin A., Golubitsky O. et al. Magnetic Measurement System for the NICA Booster Magnets, Proceedings, 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2014), Dresden, Germany. June 15–20. 2014. P. 2696. WEPRI088.
5. Butenko A., Kazinova O., Kostromin S. et al. Tolerances to the Nuclotron's booster magnetic field. JINR Preprint. 2017.
6. Gourber J. P. Philosophy of series measurements / CERN Accelerator School, Montreux, Switzerland, CERN 92-05 (1992) 84–102.
7. Walckiers L. / Magnetic measurement and alignment. 1992. Proceedings. P. 138–166.
8. Buzio M. Fabrication and calibration of search coils / CERN Accelerator School CAS 2009: Specialised Course on Magnets, Bruges, June 16–25. 2009. (CERN, Bruges, 2009). P. 387–421.
9. Bryant P. J. Basic theory for magnetic measurements / CERN Accelerator School, Montreux, Switzerland, CERN 92-05 (1992) 52-69.

PACS: 07.55.Ge

## Measurements of magnetic field parameters of the NICA booster dipole magnet

*A. M. Donyagin, V. V. Borisov, O. Kazinova, and S. A. Kostromin*

Joint Institute for Nuclear Research  
6 Joliot-Curie str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia  
E-mail: kostromin@jinr.ru; donyagin@lhe.jinr.ru; kazinova.olga@gmail.com

*Received May 5, 2017*

***Serial tests of the magnets for the NICA booster synchrotron have been started at JINR (Dubna). Accelerator optics structure consists of “Nuclotron” – type magnets with superconducting coil and iron yoke. Magnetic measurements for each magnet are intended to do for each structural unit of the magnetic-cryostat booster system. Magnetic measurement system is described in the paper. Results of the measurements done before May 2017 are presented.***

*Keywords:* synchrotron, superconductivity, magnet, measurement, coil, field, flux, harmonic, tolerance.

### REFERENCES

1. V. Kekelidze, A. Sorin, G. Trubnikov, et al., Particles and Nuclei, Letters **9** (4/5), 521 (2012).
2. H. Khodzhbagiyan, I. Meshkov, G. Trubnikov, et al., IEEE Trans.Appl.Supercond. **24** (3), 4001304 (2014).
3. H. Khodzhbagiyan and A. Smirnov, in *Proc. of ICIC12*, (Southampton). P. 841.
4. V. Borisov, A. Donyagin, H. Khodzhbagiyan et al. in *Proceeding of 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2014)*: (Dresden, Germany, June 15–20. 2014). P. 2696. WEPRI088.
5. A. Butenko, O. Kazinova, S. Kostromin, et al., *Tolerances to the Nuclotron booster magnetic field*. (JINR Preprint, 2017).
6. J. P. Gourber, in *CERN Accelerator School* (Montreux, Switzerland, CERN 92-05 1992). P. 84.
7. L. Walckiers, in *Proceedings on Magnetic Measurement and Alignment* (1992). P. 138.
8. M. Buzio, in *CERN Accelerator School CAS 2009: Specialised Course on Magnets, Bruges, June 16–25. 2009* (CERN, Bruges, 2009). P. 387.
9. P. J. Bryant, in *CERN Accelerator School*, (Montreux, Switzerland, CERN 92-05; 1992). P. 52.