

## МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЕДСЕРИЙНЫХ ДВУХАПЕРТУРНЫХ ДИПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*М. М. Шандов<sup>1</sup>, П. Г. Акишин, В. В. Борисов, А. В. Бычков,  
О. М. Голубицкий, И. И. Донгузов, А. М. Дonyaгин, Д. А. Золотых,  
М. А. Кашунин, С. А. Костромин, Г. Г. Ходжибагиян, А. В. Шемчук*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Магнитная система коллайдера NICA включает 80 двухапертурных дипольных сверхпроводящих магнитов. Измерения параметров их поля выполняются в обеих апертурах каждого магнита. В статье рассматриваются методы, первые результаты магнитных измерений и развитие разработанной системы для серийных дипольных магнитов коллайдера NICA.

The magnetic system of the NICA collider includes 80 twin-aperture superconducting dipole magnets. Measurement of the magnetic field parameters should be done for both apertures of each collider magnet. This paper describes the methods, first results of magnetic measurements and developments of the dedicated system for series dipole magnets of the NICA collider.

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

### ВВЕДЕНИЕ

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1] — новый ускорительно-накопительный комплекс, сооружаемый в ОИЯИ для изучения свойств барионной материи высокой плотности. Ключевым элементом комплекса NICA является сверхпроводящий (СП) коллайдер тяжелых ионов, состоящий из двух накопительных колец.

Структура коллайдера [2] включает 80 дипольных двухапертурных СП-магнитов с полем, формируемым железным ярмом типа «оконная рама», аналогичных по конструкции магнитам нуклотрона [3]. В ЛФВЭ ОИЯИ создан научно-экспериментальный отдел сверхпроводящих магнитов и технологий (НЭОСМТ), в задачи которого входит сборка и испытания структурных элементов комплекса NICA. Программа испытаний включает измерение параметров магнитного поля при температуре окружающей среды («теплые» измерения) и при рабочей температуре 4,5 К («холодные» измерения). Целью «теплых» магнитных измерений является раннее обнаружение дефектов в магните, проверка качества его изготовления и сборки. Для этого на стенде создан специальный участок.

---

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

«Холодные» измерения параметров поля проводятся в апертуре магнита, работающего в номинальном режиме, т. е. охлажденного до сверхпроводящего состояния обмотки и возбужденного рабочим током. Магнитные измерения проводились при постоянном (DC) и нарастающем (RC) полях. Для проведения магнитных измерений разработана и построена специальная система [4]. Измерения предсерийного магнита проводились поочередно для нижнего и верхнего ярм. Серийные магниты предполагают измерения параметров магнитного поля в обеих апертурах магнита в течение одного криогенного испытания.

Главными задачами проведенных экспериментов являлись проверка созданной системы магнитных измерений на соответствие техническому заданию, а также проверка качества магнитного поля предсерийного образца дипольного магнита коллайдера.

Цель данной статьи — описание системы магнитных измерений дипольных магнитов коллайдера NICA и обсуждение полученных результатов при испытании предсерийного образца.

### ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ КОЛЛАЙДЕРА NICA

Основные параметры двухапертурного дипольного магнита коллайдера NICA приведены в [2]. Максимальная величина индукции поля составляет 1,8 Тл. Конфигурация поля в рабочей апертуре и обратный поток формируются железным сердечником. Обмотка выполнена из трубчатого СП-кабеля типа «Нуклотрон» (рис. 1) на основе сплава NbTi [5]. Во время работы обмотка и ярмо магнита охлаждаются потоком двухфазного гелия. Величина рабочего тока магнита составляет 10,4 кА. Магниты коллайдера ра-

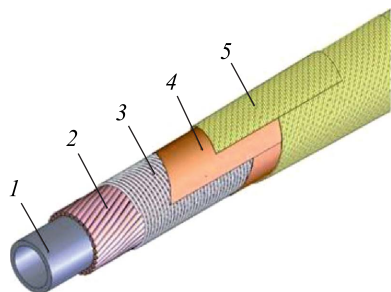


Рис. 1. СП-кабель типа «Нуклотрон»: 1 — мельхиоровая (Cu–Ni) трубка; 2 — провода сверхпроводника; 3 — нихромовая (Ni–Cr) проволока; 4 — полиамидная пленка; 5 — стеклолента

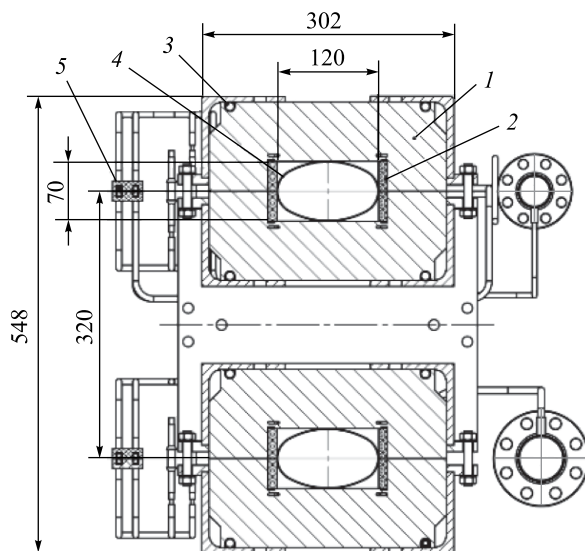


Рис. 2. Сечение двухапертурного дипольного магнита коллайдера NICA: 1 — ярмо; 2 — обмотка; 3 — трубки охлаждения; 4 — ионопровод; 5 — шинопровод

ботают на постоянном токе питания в пределах [3,3 кА; 10,4 кА]. Поперечное сечение магнита показано на рис. 2.

Ярмо состоит из трех частей (центральной, верхней и нижней), скрепляемых вместе при помощи болтов и изготовленных из пластин изотропной электротехнической стали М530-65А толщиной 0,65 мм. Длина дипольного магнита 1912 мм.

## СИСТЕМА МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Техническое задание на проведение магнитных измерений регламентирует в каждом дипольном магните измерение следующих параметров (система координат представлена на рис. 3):

$$B_0 = B_y(s = 0) = B_{\text{ref}} b_1 \text{ — поле в центре;}$$

$$BL = \int_{-\infty}^{\infty} B_y ds = B_{\text{ref}} L b_1 \text{ — интеграл магнитного поля;}$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{BL}{B_0} \text{ — вычисление эффективной длины;}$$

$$\Delta\theta = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} B_x ds}{\int_{-\infty}^{\infty} B_y ds} = -\arctg\left(\frac{a_1^*}{b_1^*}\right) \text{ — угол наклона медианной плоскости (является}$$

плоскостью симметрии ярма «верх–низ»);

$b_n^*, a_n^*, n = 1-4$  — относительные (нормированные на  $B_{\text{ref}}$  — поле в центре магнита) величины интегральных гармоник магнитного поля до четвертого порядка включительно.

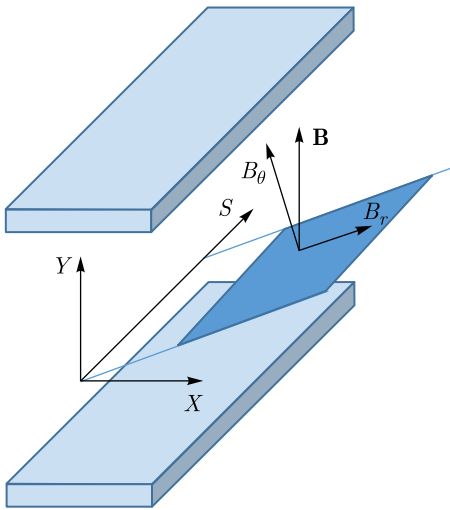


Рис. 3. Измерительная рамка и система координат, используемая в анализе результатов магнитных измерений

Для измерения вышеуказанных параметров применяется методика гармонических катушек [6–8], которая была взята за основу при разработке системы измерений для магнитов комплекса NICA. Также при разработке прототипа учитывалось следующее:

- система предназначена для серийных измерений и будет использоваться для всех магнитов соответствующего типа;

- вся серия необходимых измерений при рабочей температуре должна быть выполнена для каждого магнита за один сеанс охлаждения;

- датчик системы измерений состоит из трех равных по длине прямых печатных плат с катушками для измерения поля в основной области ярма и у его краев;

- размеры апертуры (120 × 70 × 1912 мм) делают весьма затруднительным использование антикриостата для измерительного датчика.

Для реализации метода была создана магнитометрическая система (ММС) [4] (рис. 4).

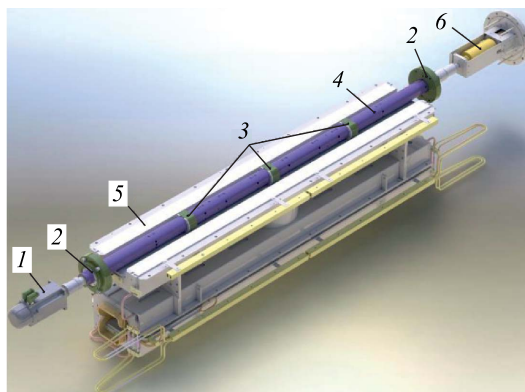


Рис. 4. Трехмерная модель ММС: 1 — сервомотор; 2 — наружные подшипники; 3 — внутренние подшипники; 4 — измерительный вал; 5 — ярмо; 6 — токосъемник и датчик угла поворота

ММС состоит из вала 4 с расположенными внутри тремя измерительными секциями гармонических катушек, сервомотора 1, токосъемника и датчика угла поворота 6. Для компенсации несоосностей, возникающих при сборке, эти элементы соединяются с помощью сильфонных муфт (рис. 6, поз. 2). Вал устанавливается в ярме магнита 5 на двух наружных опорах качения 2 и трех внутренних опорах скольжения 3, которые обеспечивают расположение измерительных секций вдоль центральной траектории пучка. Вкладыши подшипников скольжения изготовлены из специального подшипникового материала — полиэфиркетона с добавлением графита (РЕЕК НРV «bearing grade») с ПТФЭ-смазкой, трибологические свойства и возможность работы при криогенных температурах которых отвечают требованиям эксплуатации ММС. Размер секций выбран таким образом, чтобы обеспечить перекрытие всей области распространения магнитного поля.

Для измерения угла между магнитной и медианной плоскостями используется специально создаваемое реперное магнитное поле. В углах апертуры каждого магнита распо-

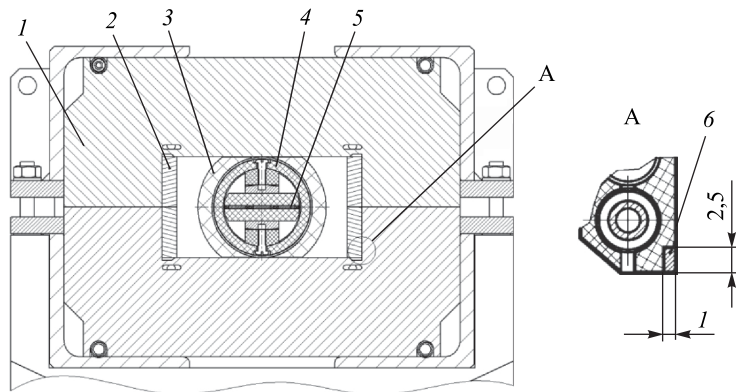


Рис. 5. Часть сечения двухапертурного дипольного магнита коллайдера с установленной ММС: 1 — ярмо; 2 — обмотка; 3 — внутренний подшипник скольжения; 4 — измерительный вал; 5 — печатная плата с измерительными катушками; 6 — реперная обмотка

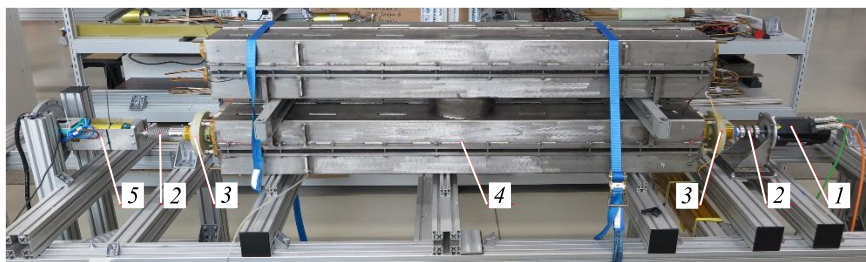


Рис. 6. Главный вид стенда для проведения «теплых» магнитных измерений: 1 — сервомотор; 2 — сильфонные муфты; 3 — наружные опоры; 4 — ярмо; 5 — токосъемник и датчик угла поворота

лагаются четыре проводника (рис. 5, поз. 6), которые соединяются в дипольную катушку. Эта катушка создает поле, направленное параллельно полюсам магнита, которое используется для определения расположения измерительных секций относительно друг друга и медианной плоскости магнита. Точность направления данного поля определяется точностью изготовления зазора ярма магнита и составляет  $3 \cdot 10^{-4}$  рад.

Основные элементы ММС и стенд для проведения «теплых» магнитных измерений показаны на рис. 6. Наружные опоры 3 состоят из керамического радиального подшипника качения и упорного подшипника скольжения с ПТФЭ-вкладышами. Опоры воспринимают основную радиальную нагрузку и обеспечивают регулировку осевого положения измерительного вала относительно ярма магнита.

Вал (рис. 7, поз. 5) склеивается из трех стеклотекстолитовых труб одинаковой длины, затем производится обработка поверхностей под установку подшипников. Измерительные секции 2 располагаются в специальном ложементе 1, после чего вся сборка устанавливается внутри вала 5 на бобышках. Измерительные секции 2 центрируются на

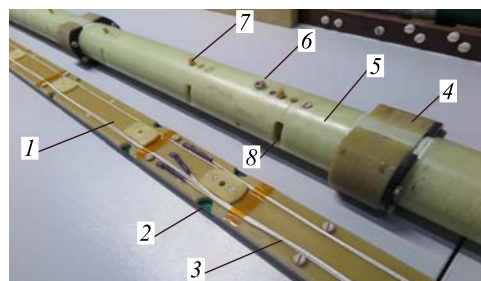


Рис. 7. Измерительный вал и ложемент: 1 — ложемент; 2 — измерительная секция; 3 — сигнальные провода; 4 — радиальный подшипник скольжения; 5 — вал; 6 — магнитный маркер; 7 — регулировочный винт; 8 — окно

оси вращения вала 5 в вертикальном и горизонтальном направлениях с помощью регулировочных винтов 7 и штифтов соответственно. Ось вращения вала 5 и положение измерительных секций измеряется с помощью манипулятора ROMER Absolute arm производства фирмы HEXAGON Metrology [9]. Ось вращения определяется как ось вращения центра магнитного маркера 6, закрепленного на поверхности вала. Специальные окна 8 выполняются в вале для обеспечения доступа измерительного щупа к измерительной секции.

Измерительная секция изготавливается по технологии печатных плат. Каждая плата (рис. 8) включает в себя три одинаковые радиальные катушки, плата состоит из 20 слоев с 20 витками в каждом слое, так что общее количество витков в каждой катушке равно 400. Основные параметры катушек приведены в табл. 1.

Измерительная секция изготавливается по технологии печатных плат. Каждая плата (рис. 8) включает в себя три одинаковые радиальные катушки, плата состоит из 20 слоев с 20 витками в каждом слое, так что общее количество витков в каждой катушке равно 400. Основные параметры катушек приведены в табл. 1.

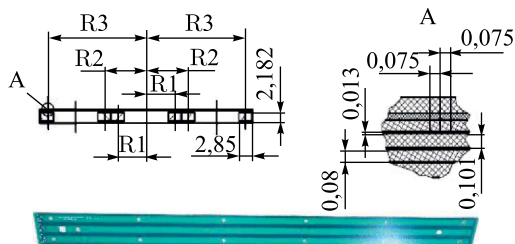


Рис. 8. Параметры и общий вид печатных плат с гармоническими катушками

Таблица 1. Основные параметры печатных плат с катушками

Параметр	Значение
Длина, мм	730
Ширина, мм	53,4
Высота, мм	2,4
R1, мм	7,325
R2, мм	10,325
R3, мм	24,975
Количество витков	400

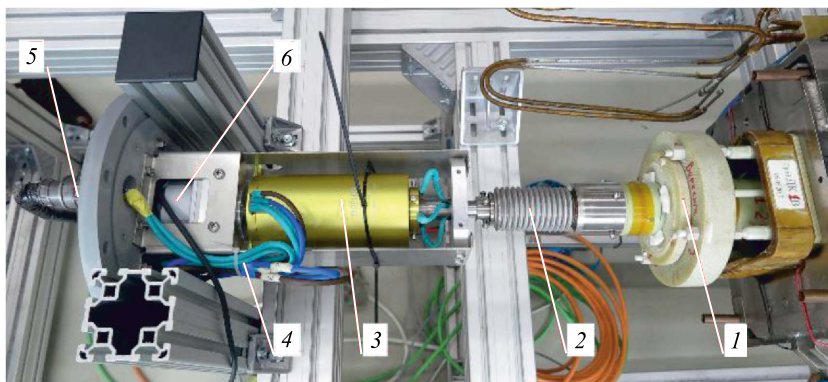
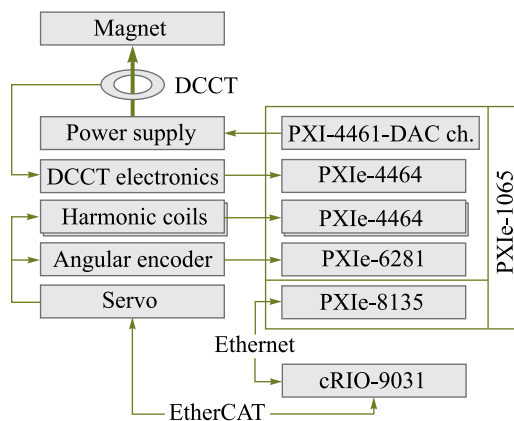


Рис. 9. Токосъемник и датчик углового положения: 1 — наружная опора; 2 — сильфонная муфта; 3 — токосъемник; 4 — сигнальные кабели; 5 — внешний разъем; 6 — датчик углового положения

Вывод 18 сигнальных кабелей осуществляется с помощью токосъемника (рис. 9), расположенного на одном валу с датчиком углового положения на конце MMC (см. рис. 4, 6, 9). В системе используется датчик углового положения фирмы HEIDENHAIN [10] с точностью 5 угловых секунд.

В системе сбора данных используется оборудование National Instruments PXI [11] (рис. 10), в частности, сбор данных и управление питанием магнита осуществляется на базе шасси PXIe1065, а управление сервомотором с помощью cRIO-9031 — через стандарт промышленных сетей EtherCAT. Управление и сбор данных проводится в программной среде, созданной на языке программирования LabView.



Отличительной особенностью стенда для «холодных» магнитных измерений

Рис. 10. Схема сбора данных и управления системой

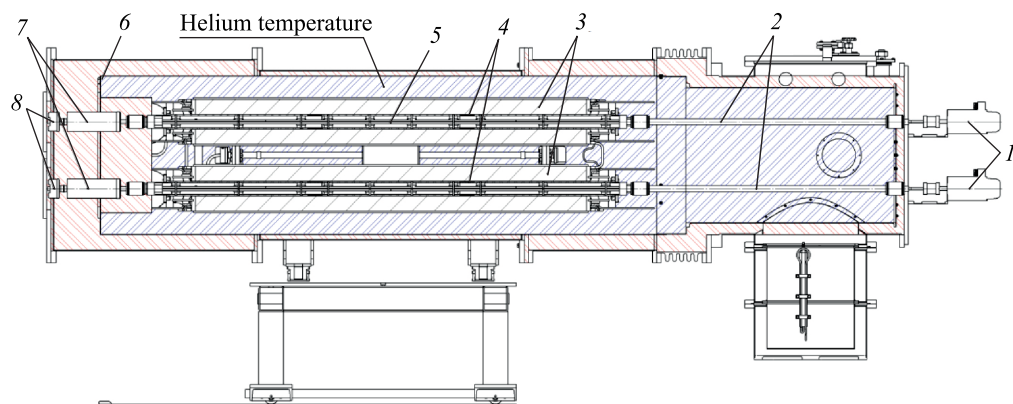


Рис. 11. Эскиз стенда для проведения «холодных» магнитных измерений: 1 — сервомоторы; 2 — промежуточные валы; 3 — ярмо магнита; 4 — измерительные валы; 5 — измерительные секции; 6 — азотный экран; 7 — токосъемники; 8 — датчики углового положения

(рис. 11) является наличие промежуточных валов 2 и азотного экрана 6. При помощи установки специального азотного экрана 6 для вывода токосъемника 7 и датчика углового положения 8 из области гелиевых температур, а также использования теплоизоляции и подогрева оборудования через монтажные кронштейны удалось достичь рабочих температур  $+19,5^{\circ}\text{C}$  для датчика углового положения и  $+15,7^{\circ}\text{C}$  для токосъемника.

### АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении РС-измерений в каждом отдельном цикле (шаге) измерения магнитного поля измерительные катушки остаются неподвижными. В результате интегрирования по времени наведенной в измерительной катушке э. д. с. определяется поток вектора магнитного поля через катушку. Интегрирование производится пошагово с разным угловым положением катушек.

На каждом измерительном шаге измерительного цикла используется следующий алгоритм:

- генерируется управляющий источником питания магнита сигнал, задающий форму и амплитуду импульса тока;
- осуществляется оцифровка соответствующих сигналов напряжений с гармонических катушек и сигнал с датчика тока;
- выполняется запись данных на жесткий носитель;
- сервомотор производит поворот измерительных катушек на угол  $\Delta\theta = 2\pi/N$  ( $N$  — количество точек измерений для дальнейшего фурье-анализа).

В процессе ДС-измерений гармонические катушки вращаются с постоянной скоростью в магнитном поле, в результате чего в них также наводится э. д. с. Измерительный цикл включает следующие шаги:

- в магните создается постоянное поле;
- сервомотор устанавливает постоянную скорость вращения катушек;

— осуществляется оцифровка соответствующих сигналов напряжений с гармонических катушек, сигнала с датчика тока и датчика углового положения;

— выполняется запись данных на жесткий носитель.

Цикл измерений (независимо от типа измерений) выполняется три раза:

— в реперном магнитном поле для определения азимутального расположения катушек относительно геометрической средней плоскости магнита;

— в основном магнитном поле для определения дипольных компонент  $A_{1i}$ ,  $B_{1i}$ ;

— в основном магнитном поле «с компенсацией сигнала» для определения более высоких гармоник  $A_{mi}$ ,  $B_{mi}$  ( $i$  обозначает номер катушки).

Компенсация сигнала — подключение гармонических катушек так, чтобы осуществлялось подавление основной (дипольной) составляющей магнитного поля для измерения более высоких гармоник поля, порядок величины которых составляет  $10^{-4}$  от основной компоненты.

В предположении неизменности распределения вдоль продольной оси магнитное поле внутри объема магнита (см. рис. 3) может быть разложено в ряд Фурье и представлено в виде сумм соответствующих гармоник [12]:

$$B_{\theta}(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} B_{\text{ref}} \left( \frac{r}{r_{\text{ref}}} \right)^{n-1} [b_n \cos(n\theta) - a_n \sin(n\theta)],$$

$$B_r(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} B_{\text{ref}} \left( \frac{r}{r_{\text{ref}}} \right)^{n-1} [a_n \cos(n\theta) + b_n \sin(n\theta)],$$

где  $B_{\text{ref}}$  — величина основной компоненты магнитного поля на радиусе  $r_{\text{ref}}$ ;  $a_n$  и  $b_n$  — относительные амплитуды соответствующих гармоник. Величина соответствующего магнитного потока, проходящего через катушку заданной геометрии, состоящей из  $N$  витков, определяется как

$$\Phi(\theta) = NL \int_{r_1}^{r_2} B_{\theta}(r, \theta) dr = NLB_{\text{ref}} \int_{r_1}^{r_2} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{r}{r_{\text{ref}}} \right)^{n-1} [b_n \cos(n\theta) + a_n \sin(n\theta)] dr$$

или

$$\Phi(\theta) = NLB_{\text{ref}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{r_{\text{ref}}}{n} \left[ \left( \frac{r_2}{r_{\text{ref}}} \right)^n - \left( \frac{r_1}{r_{\text{ref}}} \right)^n \right] [b_n \cos(n\theta) + a_n \sin(n\theta)] \right].$$

Интегрируя по времени э. д. с. в катушке, определим  $\Phi(\theta)$ :

$$\Phi(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} [B_n \cos(n\theta) + A_n \sin(n\theta)].$$

Получим относительные значения гармоник магнитного поля:

$$b_n = \frac{B_n}{NLB_{\text{ref}} \frac{r_{\text{ref}}}{n} \left[ \left( \frac{r_2}{r_{\text{ref}}} \right)^n - \left( \frac{r_1}{r_{\text{ref}}} \right)^n \right]},$$

$$a_n = \frac{A_n}{NLB_{\text{ref}} \frac{r_{\text{ref}}}{n} \left[ \left( \frac{r_2}{r_{\text{ref}}} \right)^n - \left( \frac{r_1}{r_{\text{ref}}} \right)^n \right]}.$$



$B_{\text{ref}}$  определяется по сигналу с неподвижной катушки с известной площадью, расположенной в центральной области магнита (в области плато магнитного поля).

При вычислении интегральных гармоник ( $b_n^*$ ,  $a_n^*$ ) и эффективной длины ( $L_{\text{eff}}$ ) используются гармоники с отдельно взятых катушек:

$$L_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^3 B_{1i} l_i}{B_{12}},$$

$$B_n^* = \frac{1}{L_{\text{eff}}} \sum_{i=1}^3 B_{ni} l_i, \quad A_n^* = \frac{1}{L_{\text{eff}}} \sum_{i=1}^3 A_{ni} l_i, \quad n > 1.$$

Для катушек на краях магнита ( $i = 1, 3$ )  $l_i$  совпадает с длиной катушки по центру витков; для центральной катушки ( $i = 2$ )  $l_i$  принимается равной сумме длины катушки и зазора между центрами витков соседних катушек.

Для предсерийного образца двухапертурного дипольного магнита коллайдера NICA проведена серия «теплых» и «холодных» магнитных измерений для каждой из апертур (индекс 1 относится к нижней апертуре, 2 — к верхней) (табл. 2, 3). DC-измерения выполнены на скорости  $0,8 \text{ с}^{-1}$ . Ко времени написания статьи программное обеспечение для обработки экспериментальных данных еще не позволяло определять начальную фазу для измерений в постоянном поле, в связи с чем для DC-измерений приведены амплитуды относительных интегральных гармоник:  $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ .

Анализ чувствительности к гармоникам поля (рис. 12) показывает, что разработанная ММС позволяет измерять до девятой гармоники. Перед началом производства предсерийного образца магнита проводился расчет параметров и качества магнитного поля с помощью методов конечных элементов (рис. 13).

Согласно принятой системе обозначений нижнее ярмо называется «красным», а верхнее — «синим», что нашло отражение на приведенных ниже графиках. Измеренные величины основного поля (рис. 14) и эффективных длин (рис. 15) показали сходимость между верхним и нижним ярмами и RC- и DC-измерениями.

Таблица 2. Результаты предсерийных магнитных RC-измерений для рабочего тока 10,4 кА

Измерение	$B_1$ , Тл	$L_{\text{eff}}$ , мм	$\Delta\theta$ , мрад	Относительные интегральные гармоники, $10^4$					
				$b_2$	$b_3$	$b_4$	$a_2$	$a_3$	$a_4$
RC1	1,7879	1919,61	-1,55	0,16	5,57	-0,11	0,30	-0,59	0,32
RC1 (10,8 кА)	1,8487	1919,61	-1,54	0,23	7,72	-0,11	0,36	-0,57	0,37
RC2	1,7880	1919,87	-0,48	-0,06	6,15	0,21	-0,39	-0,32	-0,01

Таблица 3. Результаты предсерийных магнитных DC-измерений для рабочего тока 10,4 кА

Измерение	$B_1$ , Тл	$L_{\text{eff}}$ , мм	$\Delta\theta$ , мрад	Амплитуды относительных интегральных гармоник, $10^4$		
				$c_2$	$c_3$	$c_4$
DC1 (10,8 кА)	1,8558	1919,31	—	1,29	8,00	0,72
DC2	1,7780	1920,96	—	1,98	5,90	0,68

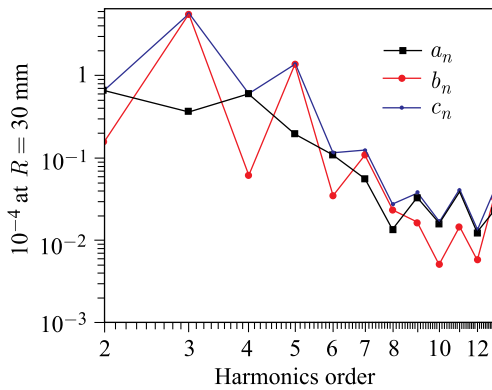


Рис. 12. Чувствительность ММС к гармоникам поля

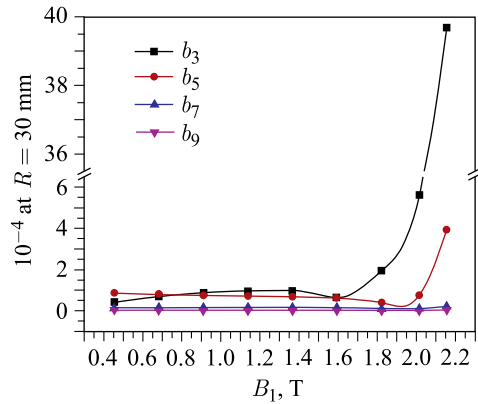


Рис. 13. Результаты моделирования качества поля

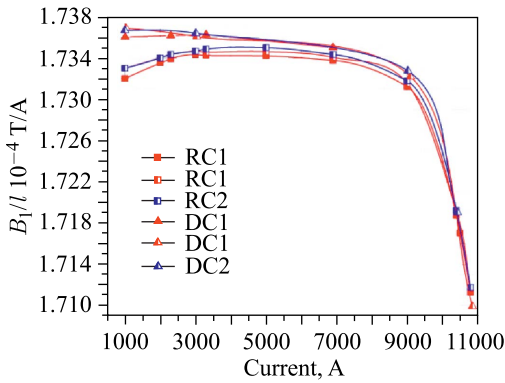


Рис. 14. Величина основного поля, нормированного на рабочий ток

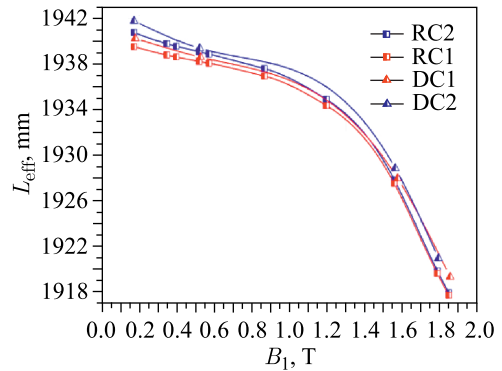


Рис. 15. Зависимость эффективных длин от величины основного поля

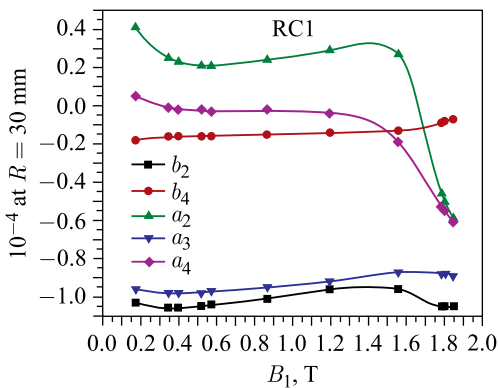


Рис. 16. Качество поля в нижней (красной) апертуре магнита

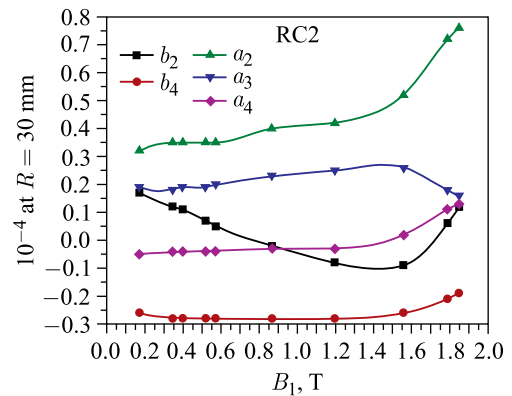


Рис. 17. Качество поля в верхней (синей) апертуре магнита

Поведение высших гармоник для радиуса 30 мм в зависимости от величины основного поля показано на рис. 16 и 17.

В дипольном магните коллайдера, как и в магнитах этого типа в нуклотроне и бустере, величина  $b_3$  составляет  $(8-10) \cdot 10^{-4}$  (рис. 18) и значительно влияет на динамику пучка в накопителе. Измеренное значение  $b_3$  в центре магнита соответствует расчетным данным (см. рис. 13).

Кроме измерений параметров магнита проводилось исследование влияния скорости нарастания рабочего тока на величину  $b_3$ . Проводились измерения с достижением рабочего тока 10,8 кА за 1, 3, 4 с (рис. 19), которые показали, что скорость нарастания рабочего тока не влияет на параметр  $b_3$ .

Поведение качества поля при DC-измерениях в зависимости от основного поля (рис. 20) схоже с RC-измерениями. Также проводилось исследование зависимости амплитуд относительных гармоник от скорости вращения датчика, которое показало, что измерение качества поля не зависит от скорости вращения.

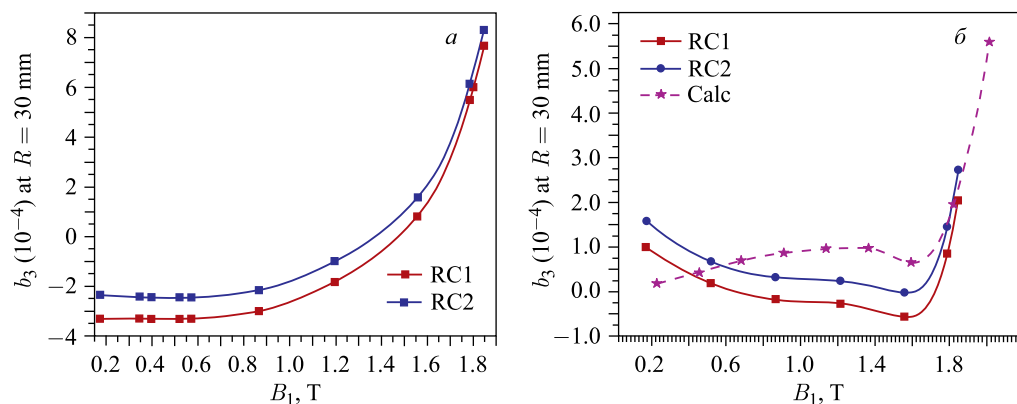


Рис. 18. Зависимость интегральной величины (а) и  $b_3$  в центре магнита (б) от величины основного поля

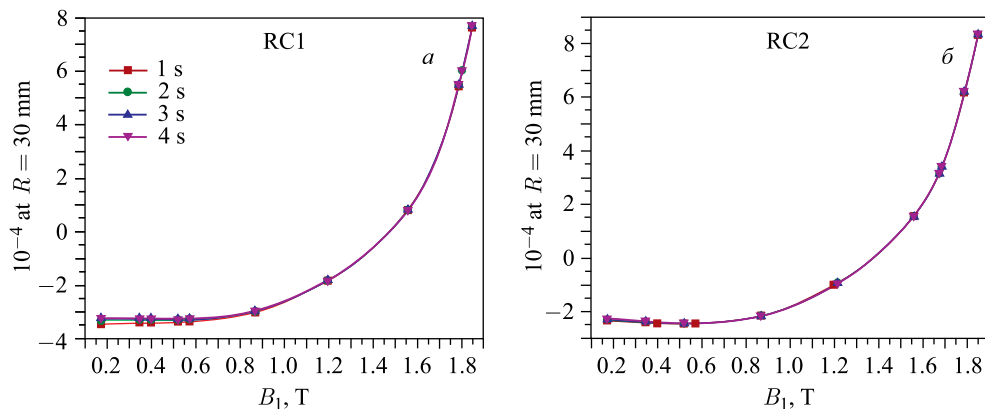


Рис. 19. Зависимость  $b_3$  от скорости нарастания рабочего тока для нижнего (RC1, а) и верхнего (RC2, б) ярм

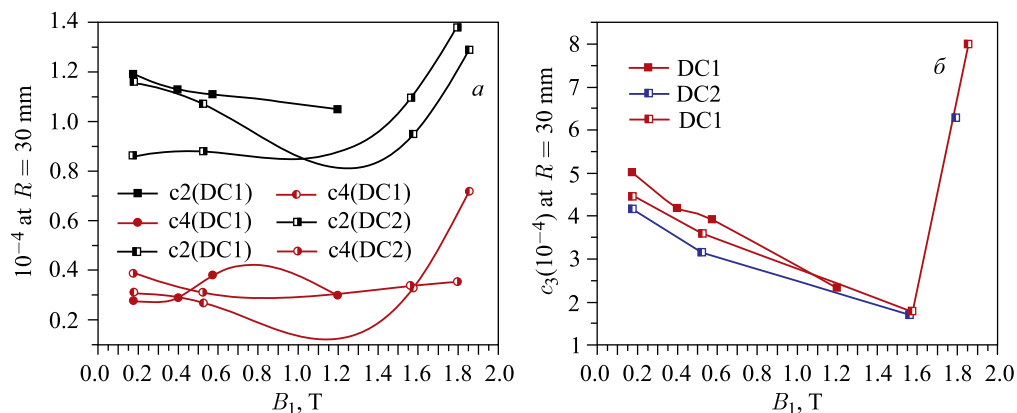


Рис. 20. Зависимость амплитуд интегральных величин относительных гармоник (а) и  $c_3$  (б) от основного поля

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для дипольных магнитов коллайдера NICA создана система, позволяющая измерять требуемые согласно спецификации параметры (поле в центре, эффективная длина, угол наклона медианной плоскости, интегральные величины относительных гармоник) с заданными точностями. Проведены измерения предсерийного образца дипольного магнита RC- и DC-методами. Расчетная величина магнитной индукции (1,8 Тл) достигается при рабочем токе 10,5 кА, что совпадает с ожидаемым (10,4 кА) с точностью 1%. Расчетная величина эффективной длины отличается от измеренной на 1%, что связано с отсутствием абсолютной калибровки датчика. Относительная разница эффективных длин для верхнего и нижнего ярм составляет  $1,35 \cdot 10^{-4}$  (при заданной  $5 \cdot 10^{-4}$ ). Амплитуды относительных гармоник не превышают  $10 \cdot 10^{-4}$  для  $b_3$  и  $1,1 \cdot 10^{-4}$  для остальных (при допуске  $10 \cdot 10^{-4}$  и  $2 \cdot 10^{-4}$  соответственно). Полученные параметры удовлетворяют требованиям спецификации. Планируется завершить отработку методики DC-измерений, изготовить два датчика серийной конструкции (с учетом выявленных недостатков) для проведения измерений в обеих апертурах магнита в течение одного криогенного испытания.

**Благодарности.** Авторы выражают глубокую признательность всем, кто оказывает поддержку и помощь в проведении экспериментов в ОИЯИ, особенно НЭОСМТ ЛФВЭ и М. М. Омеляненко за разработку малошумного источника тока питания магнита для проведения «теплых» магнитных измерений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kekelidze V. et al. Status of the NICA Project at JINR // Proc. of Conf. "Baldin ISHEPP XXIII", Dubna, 2016. P. 1–9.
2. Khodzhbagiyan H. G. et al. Superconducting Magnets for NICA Accelerator-Collider Complex // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. V. 3.
3. Khodzhbagiyan H. G., Smirnov A. The Concept of a Superconducting Magnet System for the Nuclotron // Proc. of Conf. "ICIC 12", Southampton, 2012. P. 841.

4. *Shandov M. M. et al.* Magnetic Measurement System for the NICA Collider Dual Dipoles // Proc. of Conf. "RuPAC 2016", St. Petersburg, Russia, 2016. P. 547–549.
5. *Khodzhbagiyan H. G. et al.* Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Collider Project // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 3.
6. *Jain A. K.* Measurements of Field Quality Using Harmonic Coils // US Particle Accelerator School on Superconducting Magnets, 2001.
7. *Gourber J. P.* Philosophy of Series Measurements // CERN Accelerator School, Montreux, Switzerland, 1992. CERN 92-05. P. 84–102.
8. *Buzio M.* Fabrication and Calibration of Search Coils // CERN Accelerator School CAS 2009: Specialised Course on Magnets, Bruges, Belgium, 2009. P. 387–421.
9. <http://www.hexagonmi.com>
10. <http://www.heidenhain.ru>
11. <http://www.ni.com>
12. *Bryant P. J.* Basic Theory for Magnetic Measurements // CERN Accelerator School, Montreux, Switzerland, 1992. CERN 92-05. P. 52–69.