

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДИПОЛЬНОГО МАГНИТА БУСТЕРА NICA

*С. А. Костромин¹, В. В. Борисов, А. В. Бычков, О. М. Голубицкий,
А. М. Донягин, Н. А. Морозов, Е. В. Самсонов, М. М. Омеляненко,
Г. Г. Ходжибагиян, А. В. Шемчук*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В ЛФВЭ ОИЯИ начаты серийные сборка и испытания дипольных и квадрупольных магнитов бустера NICA. Структура ускорителя состоит из магнитов типа нуклотрон, в которых используется сверхпроводящая обмотка и железное ярмо для формирования необходимого магнитного поля. На основе опыта создания и эксплуатации нуклотрона ОИЯИ конструкция магнитов для комплекса NICA была оптимизирована для создания магнитных полей требуемых конфигураций с точки зрения динамики пучка в ускорителе и коллайдере. В процессе сборки и испытаний каждого модуля магнитно-криостатной системы бустера и коллайдера NICA предполагается проведение измерений характеристик поля каждого магнита. В работе приводятся результаты магнитных измерений дипольного магнита бустера NICA.

Serial assembly and tests of the lattice magnets of NICA booster synchrotron have been started at LHEP JINR. Accelerator optics structure consists of “Nuclotron”-type magnets with superconducting coil and iron yoke for shaping of the magnetic field. Design of the magnets for NICA project was optimized based on the operating experience of the JINR Nuclotron. Measurements of the magnetic field parameters are stage of the serial tests of the lattice magnet unit. The results of the magnetic measurements of the NICA booster dipole are presented and discussed.

PACS: 07.55.Ge

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс NICA [1] состоит из двух инжекционных цепочек на базе линейных ускорителей, строящегося бустерного синхротрона (бустер NICA), существующего ускорителя нуклотрон и разрабатываемого коллайдера пучков для проведения физических экспериментов по изучению поведения барионной материи высокой плотности.

Структурными элементами бустера и коллайдера NICA являются сверхпроводящие (СП) магниты с полем, формируемым железным ярмом (типа «оконная рама» для дипольных и с гиперболическими полюсами для квадрупольных магнитов) [2–4]. Они аналогичны по конструкции магнитам нуклотрона [5]. В ЛФВЭ ОИЯИ сооружается участок для сборки и испытаний данных магнитов. Программа тестов включает измерения

¹E-mail: kostromin@jinr.ru

параметров магнитного поля как при температуре окружающей среды, так и при рабочей температуре магнита 4,5 К. В конце 2014 г. были проведены испытания дипольного магнита, в том числе теплые (при комнатной температуре) и холодные (при температуре жидкого гелия) магнитные измерения. Целью теплых магнитных измерений является раннее обнаружение дефектов в магните, проверка качества его изготовления и сборки. Для этого в сборочно-тестовом цехе создан участок теплых магнитных измерений. Холодные измерения качества поля проводились в апертуре магнита, работающего в номинальном режиме, т.е. охлажденного до сверхпроводящего состояния обмотки и возбужденного максимальным рабочим током. Для проведения магнитных измерений была разработана и построена система магнитных измерений [3].

Главными задачами проведенных магнитных измерений были проверка созданной системы магнитных измерений на соответствие техническому заданию и ее способность проводить измерения с требуемыми точностями, а также проверка качества магнитного поля предсерийного образца дипольного магнита бустера NICA.

Целью данной статьи является описание системы магнитных измерений дипольных магнитов бустера NICA и обсуждение результатов магнитных измерений предсерийного образца.

1. ДИПОЛЬНЫЙ МАГНИТ БУСТЕРА NICA

Параметры дипольного магнита ускорителя приведены в [2]. Существенной особенностью, влияющей на выбор методики магнитных измерений и на конструкцию магнитометрической системы (ММС), является кривизна магнита. Радиус изгиба по центру апертур магнита составляет 14,09 м. Максимальная величина индукции поля в магнитах — 1,8 Тл. Конфигурация поля в рабочей апертуре и обратный поток формируются железным сердечником. При работе магнита обмотка и ярмо охлаждаются потоком двухфазного гелия. Обмотка магнита сделана из трубчатого СП-кабеля на основе сплава NbTi. Величина рабочего тока магнита составляет ~ 10 кА. В номинальном цикле работы бустера предусмотрено линейное нарастание и спад магнитного поля со скоростью 1,2 Тл/с. Поперечное сечение дипольного магнита для бустера NICA показано на рис. 1.

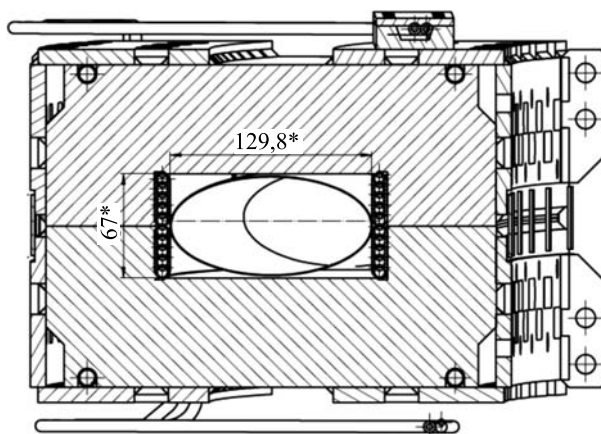


Рис. 1. Поперечное сечение ярма дипольного магнита бустера NICA

Ярмо состоит из двух симметричных частей — полуярем, скрепляемых вместе при помощи болтов. Полуярма изготовлены из пластин изотропной электротехнической стали М530-65А толщиной 0,65 мм. Длина дипольного магнита — 2,2 м.

2. СИСТЕМА МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В соответствии с техническим заданием на проведение магнитных измерений в каждом дипольном магните должны быть определены следующие параметры (система координат показана на рис. 2):

- $B_0 = B_y(s = 0) = B_{\text{ref}} b_1$ — поле в центре;
- $-BL = \int_{-\infty}^{\infty} B_y ds = B_{\text{ref}} L b_1$ — интеграл магнитного поля;
- $L_{\text{eff}} = \frac{BL}{B_0}$ — эффективная длина;
- $-\Delta\theta = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} B_x ds}{\int_{-\infty}^{\infty} B_y ds} = \frac{a_1^*}{b_1^*}$ — угол наклона медианной плоскости относительно

средней плоскости магнита, являющейся плоскостью симметрии «верх–низ»;

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

В табл. 1 представлены допуски на параметры поля при максимальном токе питания магнита, из которых следуют требования на точность измерения соответствующих величин.

Наиболее эффективной из существующих методик для серийных измерений является методика вращающихся катушек [6–8]. Она выбрана для определения параметров магнитных полей всех структурных элементов комплекса NICA.

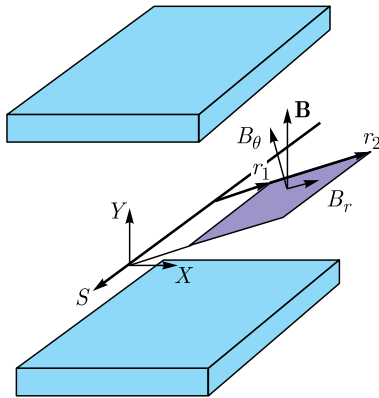


Рис. 2. Измерительная рамка в системе координат, используемой в анализе результатов магнитных измерений

Таблица 1. Допуски на параметры магнитного поля

Параметр	Допуск
Относительный разброс эффективных длин (от магнита к магниту)	$1 \cdot 10^{-4}$
Угол наклона медианной плоскости, рад	$1 \cdot 10^{-4}$
Относительные интегральные гармоники:	
b_2^*	$5 \cdot 10^{-4}$
a_2^*	$5 \cdot 10^{-4}$
b_3^*	$1 \cdot 10^{-3}$
$b_n^*, a_n^*, n > 3$	$1 \cdot 10^{-3}$

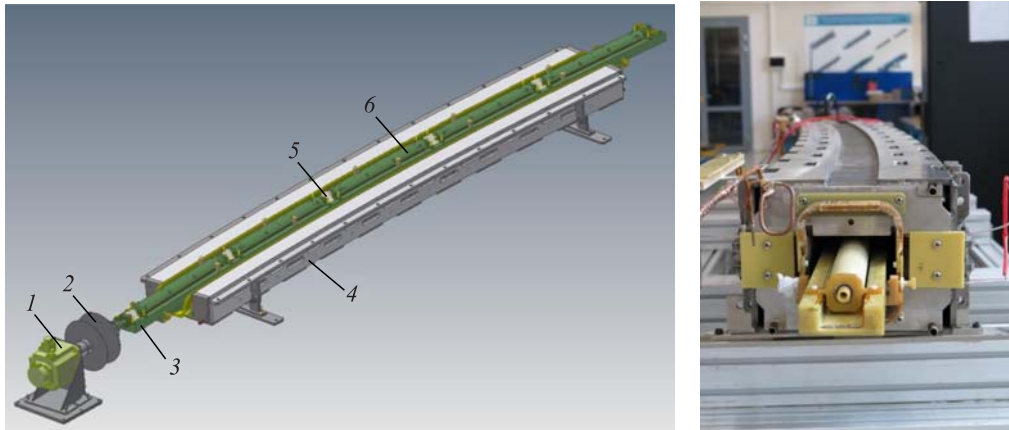


Рис. 3. Слева — трехмерная модель ММС: 1 — сервомотор; 2 — катушка для сигнального кабеля; 3 — ложемент датчика; 4 — нижнее полуядро магнита; 5 — сильфонное соединение между измерительными секциями; 6 — измерительная секция; справа — вид датчика внутри ядра магнита

Дипольный магнит бустера — изогнутый. Поэтому измерительный датчик для него состоит из нескольких (пяти) прямолинейных относительно коротких секций, расположенных в общем ложементе, который опирается на плоскость апертуры магнита. Таким образом, точность расположения датчика внутри магнита определяется точностью изготовления его железного ядра. Трехмерная модель ММС в полуядре и ее вид внутри ядра магнита показаны на рис. 3.

Внутри каждой измерительной секции находятся три радиальные измерительные катушки. Секции соединены между собой сильфонными муфтами. Крайняя секция расположена перпендикулярно плоскости торца ядра и покрывает область вне магнита, где величина поля становится достаточно малой для обеспечения необходимой точности измерения интегральных величин (рис. 4).

Дополнительно в общем ложементе датчика предусмотрен общий виток шириной около 60 мм, покрывающий всю область существования магнитного поля в продольном направлении. Магнитный поток, измеряемый этим витком, позволяет определять значе-

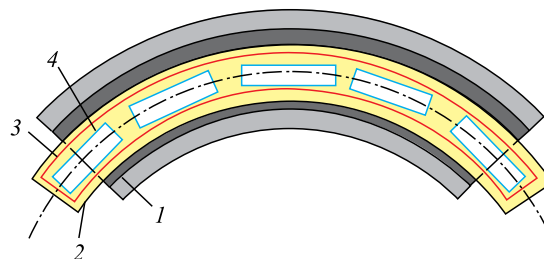


Рис. 4. Схема расположения измерительных стационарных катушек (вид в плане): 1 — ядро магнита; 2 — ложемент датчика; 3 — виток для определения эффективной длины; 4 — измерительные катушки

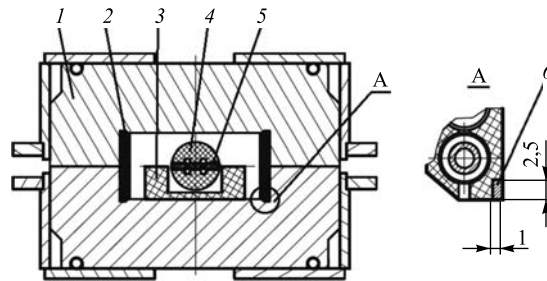


Рис. 5. Сечение дипольного магнита с датчиком, расположенным внутри апертуры: 1 — железное ярмо; 2 — обмотка; 3 — ложемент датчика магнитометрической системы; 4 — корпус датчика; 5 — измерительные гармонические катушки; 6 — реперная обмотка

ние эффективной длины, усредненное по ширине витка. Поперечное сечение магнита с расположенным внутри датчиком ММС показано на рис. 5.

Гармонические катушки изготовлены по технологии многослойных печатных плат. Каждая плата включает в себя три одинаковые радиальные катушки, плата состоит из 20 слоев с 20 витками в каждом слое, так что общее число витков в каждой катушке равно 400. Параметры радиусных обмоток представлены в табл. 2 и на рис. 6. Точность расположения катушек относительно магнита определяется точностью изготовления ярма и самих механических элементов измерительного датчика.

Таблица 2. Параметры гармонических катушек датчика

R1, мм	6,425
R2, мм	9,425
R3, мм	22,275
L, мм	428,95
Число витков	400

Привязка системы координат измерительного датчика к ярму магнита осуществляется с помощью дополнительной обмотки, состоящей из двух витков, расположенных в углах апертуры магнита (см. рис. 5). Данная обмотка создает дипольное поле, направленное параллельно геометрической средней плоскости магнита. Точность направления данного поля определяется точностью изготовления зазора ярма магнита и составляет $3 \cdot 10^{-4}$ рад.

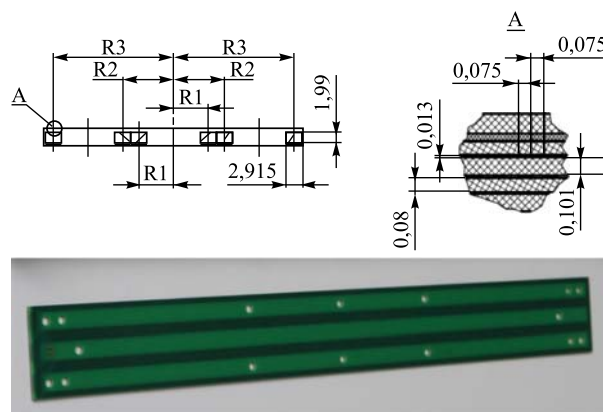


Рис. 6. Параметры и внешний вид печатной платы с гармоническими катушками

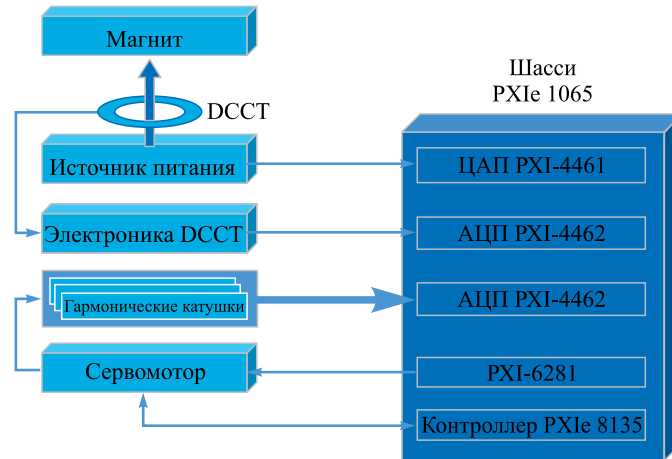


Рис. 7. Схема сбора данных и управления системой

Система сбора данных использует оборудование «National Instruments (NI) PXI». Управление сбором данных работает в среде LabView. Схема сбора данных и управления системой показана на рис. 7.

3. СБОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В каждом отдельном цикле изменения магнитного поля измерительные катушки остаются неподвижными. Измерения состоят в определении потока вектора индукции магнитного поля через катушку путем интегрирования наведенной в ней ЭДС по времени и повторяются пошагово с разным угловым положением катушек.

На каждом шаге измерительного цикла выполняется следующая последовательность действий:

- генерируется управляющий источником питания сигнал, задающий форму и амплитуду импульса тока;
- оцифровываются соответствующие сигналы напряжений с гармонических катушек и сигнал с датчика тока;
- производится запись полученных данных на жесткий носитель;
- при помощи сервопривода выполняется поворот гармонических катушек магнитометра на угол $\Delta\theta = 2\pi/N$ (N — количество измерений для фурье-анализа).

Цикл измерений повторяется три раза:

- в реперном магнитном поле для определения азимутального расположения катушек φ_i относительно геометрической средней плоскости магнита;
- в основном поле магнита в режиме «без компенсации сигнала» для определения дипольной компоненты A_{1i}, B_{1i} ;
- в основном поле магнита «компенсацией сигнала» для определения более высоких гармоник A_{ni}, B_{ni} (индекс i обозначает номер катушки).

Компенсация сигнала — включение гармонических катушек последовательно «навстречу друг другу». Применяется для подавления сигнала индуцируемого основной — дипольной составляющей магнитного поля при измерении более высоких гармоник поля, которые по порядку величины равны 10^{-4} от дипольной компоненты.

Магнитное поле внутри объема магнита (см. рис. 2) в предположении неизменности распределения вдоль продольной оси может быть разложено в ряд Фурье и представлено в виде сумм соответствующих гармоник [10]:

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

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

где B_{ref} — величина основной компоненты магнитного поля на радиусе r_{ref} , а b_n и a_n — относительные амплитуды соответствующих гармоник. Величина соответствующего магнитного потока, пронизывающего катушку заданной геометрии, состоящей из N витков, вычисляется как

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

или

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

Вычисляя $\phi(\theta)$ интегрированием по времени ЭДС в катушке:

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

получаем относительные значения гармоник магнитного поля:

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

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

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

Для вычисления эффективной длины магнита используется сигнал с общего витка в ложементе, а также с упомянутой выше катушки.

Эффективная длина магнита $\langle L_{\text{eff}} \rangle$ определяется соотношением

$$\langle L_{\text{eff}} \rangle = \frac{\langle BL \rangle}{B_0} = \frac{\iint B_y dS}{wB_0} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} U dt}{wB_0},$$

где

$$B_0 = \frac{\int_{t_0}^{t_1} U_0 dt}{S_0},$$

w — ширина общего витка.

При вычислении эффективной длины по результатам измерений сигналов со стационарных катушек необходимо сделать поправки на тепловое расширение материалов. Предполагается, что мы можем пренебречь величиной магнитного потока при нулевом токе, т. е. потоком остаточного магнитного поля.

Интегральные гармоники магнитного поля вычисляются суммированием гармоник с отдельно взятых катушек (см. рис. 3):

$$B_n = \frac{1}{L_{\text{eff}}} \sum_{i=1}^5 B_{ni} \cdot l_i, \quad A_n = \frac{1}{L_{\text{eff}}} \sum_{i=1}^5 A_{ni} \cdot l_i, \quad n > 1,$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^5 B_{1i} \cdot l_i}{B_{13}}.$$

Для катушек, расположенных на краях магнита ($i = 1, 5$), l_i совпадает с длиной катушки; для катушек с индексами 2, 3 и 4 l_i принимается равным $1/3$ длины дуги внутри магнита между границами катушек 1 и 5.

Для предсерийного образца дипольного магнита бустера NICA была проведена серия «теплых» (с током до 100 А при температуре окружающей среды) и «холодных» (с током до 10 кА при охлажденном до $\sim 4,5$ К магните) измерений. Серия «теплых» измерений включает в себя данные, полученные до и после сборки/разборки ядра магнита, а также до и после демонтажа/монтажа датчика магнитометра внутрь ядра. Результаты обработки полученных данных представлены ниже.

Из рис. 8 видно, что измеренная эффективная длина с ростом величины поля (тока питания магнита) уменьшается (что связано с эффектами насыщения железного ядра) на 1,3 %, а расчетное уменьшение составляет 0,6 %. Данное расхождение может быть связано с неточностью расчетной модели в области краевого поля, где эффекты насыщения проявляются наиболее сильно. Расчетные значения учитывают тепловое сжатие магнита при охлаждении до 4,5 К. Величина эффективной длины зависит от значения магнитного поля в области до $\sim 0,5$ Тл. Данной зависимости нет в результатах расчета. Это проявление динамических эффектов, таких как токи намагничивания [11], связанных с тем, что измерения проводятся не в статическом магнитном поле, а в изменяющемся со скоростью 1,8 Тл/с поле. На рис. 9 показана зависимость угла наклона медианной плоскости магнита при разных токах питания.

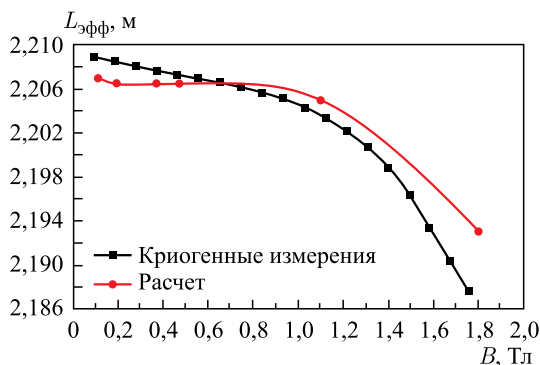


Рис. 8. Зависимость эффективной длины магнита от магнитного поля в центральной области по данным измерений гармоническими катушками

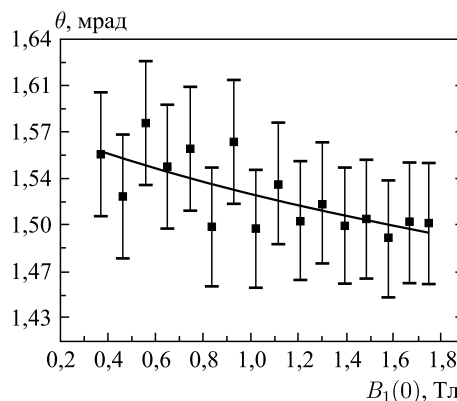


Рис. 9. Зависимость угла наклона медианной плоскости относительно продольной оси магнита от величины поля

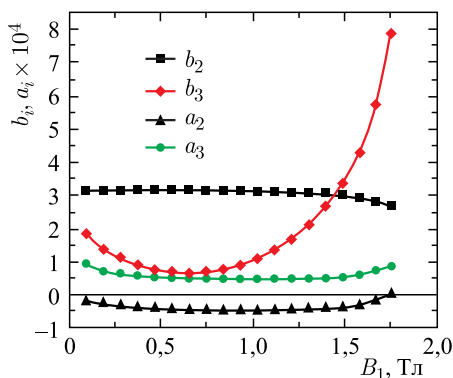


Рис. 10. Зависимость амплитуды гармоник от величины магнитного поля в центре

Следует отметить, что угол дипольного поля оказался самой чувствительной к шумам в измеряемых сигналах величиной. Используемый при проведении теплых магнитных измерений источник тока [12] имеет существенно более низкий уровень шумов. Это является одним из факторов, способствующих при измерениях фазы первой гармоники при теплых измерениях тому, что отмечается высокая повторяемость: 0,04 мрад для результатов серий по 5–10 измерений в различные дни.

Измерение относительных интегральных гармоник (рис. 10) показало, что качество магнитного поля соответствует требованиям технического задания.

4. ВЫВОДЫ

Для дипольных магнитов бустера NICA создана система, позволяющая измерять разброс эффективных длин, интегральные относительные гармоники магнитного поля и угол между магнитной и механической медианными плоскостями магнита в соответствии

с требованиями по точности измерений, установленными в техническом задании на магнитные измерения.

Проведены измерения качества магнитного поля предсерийного образца дипольного магнита бустера NICA. Измеренные гармоники магнитного поля удовлетворяют допускам, заданным в техническом задании.

Амплитуды второй и третьей гармоник дипольного магнита в предсерийном образце не превышают $10 \cdot 10^{-4}$. Точность их измерения составляет $1 \cdot 10^{-4}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V. et al.* NICA Project at JINR // Part. Nucl. 2012. V. 9, No. 4/5. P. 521–526.
2. *Khodzhibagiyan H. et al.* Superconducting Magnets for the NICA Accelerator-Collider Complex // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. V. 24, No. 3. P. 4001304.
3. *Khodzhibagiyan H. et al.* Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Complex in Dubna // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 1, No. 3. P. 1795.
4. *Khodzhibagiyan H. et al.* Status of the Development of Superconducting Magnets for the NICA Project // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2012. V. 22, No. 3. P. 4003004.
5. *Khodzhibagiyan H., Smirnov A.* The Concept of a Superconducting Magnet System for the Nuclotron // Proc. of ICIC12, Southampton, 1988. P. 841.
6. *Gourber J. P.* Philosophy of Series Measurements // CERN Accel. School, Montreux, Switzerland, 1992. CERN 92-05. P. 84–102.
7. *Walckiers L.* Magnetic Measurement and Alignment // Proc. 1992. P. 138–166.
8. *Buzio M.* Fabrication and Calibration of Search Coils // CERN Accel. School (CAS 2009): Specialised Course on Magnets, Bruges, June 16–25, 2009. CERN. Bruges, 2009. P. 387–421.
9. *Borisov V. et al.* Magnetic Measurement System for the NICA Booster Magnets // Proc. of the 5th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2014), Dresden, Germany, June 15–20, 2014. P. 2696. WEPRI088.
10. *Bryant P. J.* Basic Theory for Magnetic Measurements // CERN Accel. School, Montreux, Switzerland, 1992. CERN 92-05. P. 52–69.
11. *Walckiers L. et al.* Field Quality of the LHC Dipole Magnets in Operating Conditions // Proc. of EPAC 2002, Paris, 2002.
12. *Омельяненко М. М.* Блок регулирования тока РТ-01 с транзисторным регулирующим элементом в линейном режиме. Препринт ОИЯИ Р13-2015-95. Дубна, 2015.