

# РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУННЫХ МЕТОДИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ МАГНИТНОЙ ОСИ СТРУКТУРНЫХ КВАДРУПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ БУСТЕРА И КОЛЛАЙДЕРА NICA

*И. Ю. Николайчук<sup>a, 1</sup>, В. В. Борисов<sup>a</sup>, С. А. Костромин<sup>a</sup>,  
Д. Н. Никифоров<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Струнные методики измерений магнитных полей структурных элементов ускорителей являются высокоточным средством определения основных параметров магнитного поля. При производстве магнитов бустера и коллайдера комплекса NICA (ОИЯИ, Дубна) вибрационная струнная методика использовалась для определения положения магнитной оси квадрупольных магнитов. Полученные результаты были использованы при юстировке магнитов в кольце ускорителя. В данной статье представлены основные результаты проведенных измерений и исследований. Приводятся результаты математического моделирования формы замкнутой орбиты пучка, подчеркивающие практическую ценность использования полученных данных при юстировке.

Wire techniques are precise methods to measure the main magnetic field parameters of accelerator's magnets. Vibrating wire method was used to determine the magnetic axis position of the NICA Collider and Booster quadrupoles (JINR, Dubna). Measurement results are applied to correct magnets alignment at accelerator lattice. This paper describes the main results of the measurements and studies. The results of closed orbit modeling, emphasizing practical value of the obtained measurement data for alignment, are given.

PACS: 29.20.—c

## ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) включает в себя сверхпроводящие синхротроны нуклотрон и бустер, а также сверхпроводящий коллайдер [1]. Магнитная структура данных ускорителей основана на магнитных элементах типа «нуклотрон», изготавливаемых в Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) ОИЯИ [2]. Нуклотрон запущен в 1993 г., бустер в 2020 г. В настоящее время завершено производство всех элементов магнитооптической структуры коллайдера. Магнитооптическая структура бустера включает в себя 48 квадрупольных магнитов,

---

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

объединенных в 24 дублета. Коллайдер включает в себя 70 модулей квадрупольных магнитов — 46 в арках, 12 двухапертурных дублетов и 12 одноапертурных магнитов финальной фокусировки пучка.

Качество изготовления и сборки магнита определяется при проведении измерений параметров магнитного поля. При производстве магнитов бустера и коллайдера магнитные измерения проводились при температуре окружающей среды (для выявления грубых ошибок на раннем этапе изготовления магнита) и при рабочей температуре 4,5 К. Основным методом измерений был выбран метод гармонических катушек [3, 4]. Для более точного определения положения магнитной оси квадрупольных магнитов использовалась методика вибрирующей струны [5–8]. Магнитной осью квадрупольного магнита является линия в апертуре магнита, на которой величина магнитного поля равна нулю. Определение положения магнитной оси вибрирующей струной заключается в измерении зависимости механических колебаний струны от ее положения в апертуре магнита. Колебания струны возникают при взаимодействии переменного тока, подаваемого на струну, и постоянного поля измеряемого магнита. Магнитная ось определяется как положение струны, соответствующее минимуму амплитуды колебаний. Измерения положения магнитной оси проводились при температуре окружающей среды ввиду сложности разработки антикриостата, отделяющего «холодное» ядро магнита от «теплого» объема в апертуре магнита, необходимого для размещения струны.

В идеальном случае замкнутая орбита пучка в квадрупольном магните должна проходить по магнитной оси. Поперечное смещение магнита ведет к появлению на траектории движения дипольной компоненты магнитного поля, что приводит к соответствующему смещению орбиты пучка. Учет положения магнитной оси каждого квадрупольного магнита при юстировке позволяет значительно снизить данный негативный эффект. Моделирование поведения замкнутой орбиты пучка в бустере и коллайдере подчеркивает актуальность проведенных измерений для достижения проектных параметров установок.

## **КВАДРУПОЛЬНЫЕ МАГНИТЫ БУСТЕРА И КОЛЛАЙДЕРА**

Модуль квадрупольных магнитов бустера представляет собой дублет фокусирующего (Ф) и дефокусирующего (Д) магнитов, жестко связанных между собой (рис. 1, а). В данной конфигурации магнитную ось дублета можно определить как прямую, проходящую через магнитные центры магнитов Ф и Д. Для каждого магнита в модуле магнитный центр определяется как точка пересечения магнитной оси данного магнита с перпендикулярной плоскостью в продольном центре.

Квадрупольные магниты арок коллайдера — двухапертурные с жесткой связью между апертурами (рис. 1, б). Это накладывает ограничения на возможности юстировки данных магнитных элементов — смещение по вертикальной оси возможно только одновременно для обеих апертур. При юстировке по горизонтали, в свою очередь, может возникнуть угол поворота квадрупольных магнитов в случае, если смещения в верхней и нижней апертурах различны по величине или противоположны по направлению.

Дублеты квадрупольных магнитов коллайдера — сборка из четырех магнитов с жесткой связью (рис. 1, в). В данном случае ось дублетов каждой апертуры опреде-

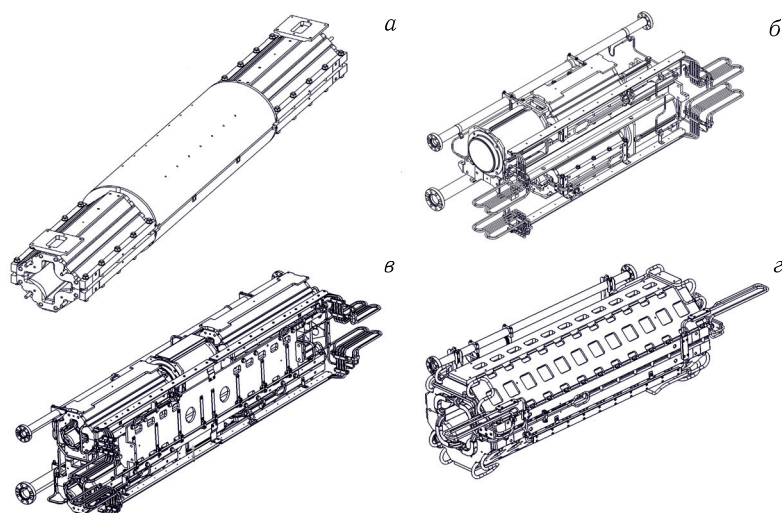


Рис. 1. Квадрупольные магниты: а) дублет магнитов бустера; б) магнит арки коллайдера; в) двухапертурный дублет коллайдера; г) магнит финальной фокусировки коллайдера

ляется по магнитным центрам двух магнитов. При юстировке имеются ограничения, аналогичные арочным магнитам, описанным выше.

Квадрупольные магниты финальной фокусировки коллайдера — одноапертурные магниты, расположенные в окрестностях двух точек встречи пучков (рис. 1, г). С точки зрения юстировки данные магниты не имеют существенных ограничений.

## МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Система измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов бустера [6] разработана в ЛФВЭ ОИЯИ и впоследствии модернизирована для измерений магнитов коллайдера [7, 8]. Схема измерительной системы представлена на рис. 2.

Определение положения магнитной оси включает в себя два основных этапа — поиск магнитной оси при помощи струны и перенос координат струны в систему

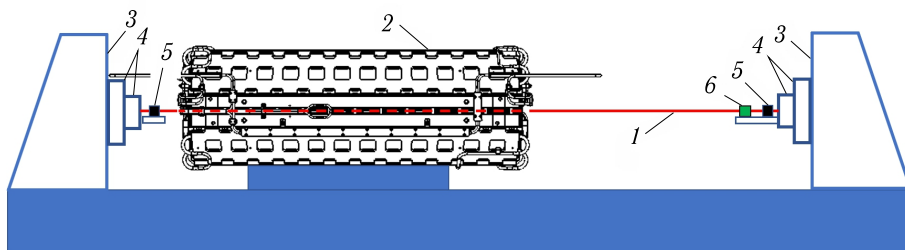


Рис. 2. Схема измерительной системы: 1 — струна; 2 — квадрупольный магнит; 3 — стойки поддержки основных узлов системы; 4 — система перемещения струны; 5 — система натяжения струны; 6 — система детектирования колебаний

координат магнита. Выставление струны в магнитную ось заключается в нахождении такого положения струны, при котором амплитуда ее механических колебаний минимальна [5]. Для компенсации вклада внешних магнитных полей, не зависящих от тока питания обмотки магнита, измерения проводятся в двух полярностях тока питания [9]. Перенос координат струны в систему координат магнита производится координатно-измерительной машиной. Система координат магнита строится по реперным точкам на ярме.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения положения магнитной оси завершены для всех квадрупольных магнитов бустера и коллайдера NICA. Основные результаты приведены на рис. 3. Началом системы координат на приведенных графиках является номинальное положение оси симметрии магнита относительно реперных точек согласно конструкторской документации. Полученные отклонения магнитной оси от номинального положения включают в себя ошибки производства, сборки и измерений магнита.

Точность измерительной системы находится в пределах  $\pm 0,05$  мм. Результаты измерений показывают наличие разброса, превышающего точность измерений. Это объясняется точностью изготовления и сборки магнитов, имеющей величину поряд-

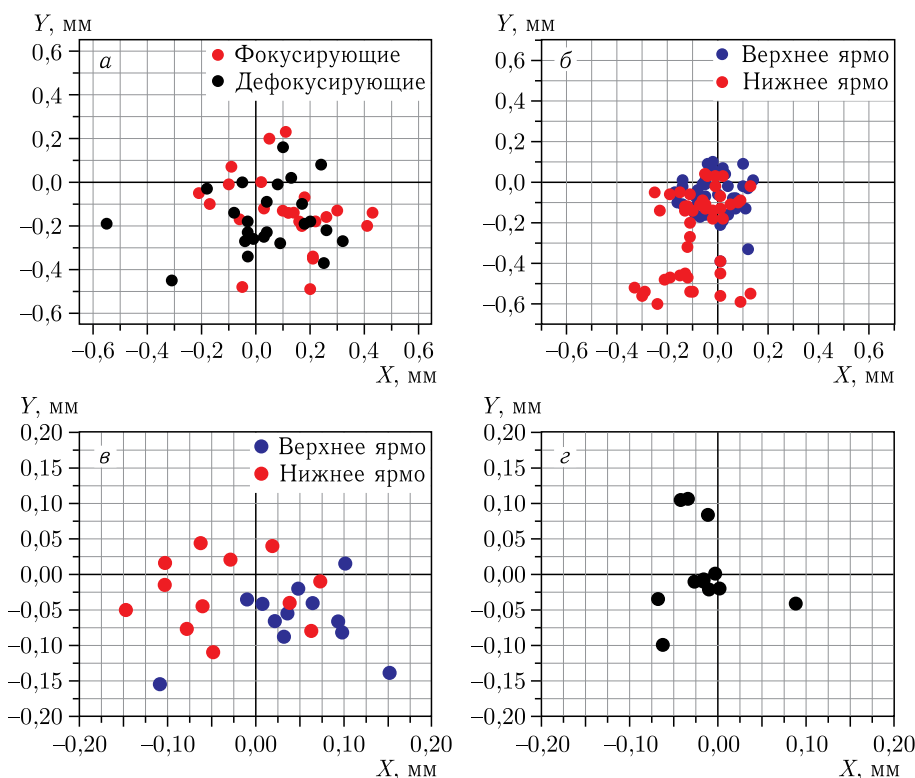


Рис. 3. Положение магнитной оси квадрупольных магнитов: а) бустера; б) арок коллайдера; в) двухапертурных дублетов коллайдера; г) финальной фокусировки коллайдера

ка  $\pm 0,2$  мм. Для магнитов бустера было определено, что увеличение разброса результатов измерений положения магнитной оси связано с качеством изготовления и позиционирования реперных площадок, определяющих систему координат магнита. Некоторая часть арочных магнитов коллайдера имеет отклонения в магнитных свойствах нержавеющей стали, используемой при изготовлении торцевых пластин магнита. Данные отклонения влияют на характеристики магнитного поля, в том числе на положение магнитной оси.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАМКНУТОЙ ОРБИТЫ

Моделирование проводилось в программе OptiMX [10]. Варьируемыми параметрами являлись смещение квадрупольных магнитов в поперечной плоскости и угол поворота магнита (для двухапертурных модулей). Основные результаты приведены на рис. 4, 5.

Сравнение производилось для двух положений магнитов. Первое положение соответствует номинальному положению оси согласно конструкторской документации. В данном случае при моделировании поперечное положение магнита смещалось на величину, определенную при измерениях. Второе положение магнитов соответствует их поперечному смещению на измеренные величины при учете особенностей юстировки. Таким образом, первое положение соответствует гипотетической юстировке магнитов без учета данных магнитных измерений, а второе — юстировке с учетом полученных данных (см. рис. 4, 5).

При юстировке дублетов бустера и магнитов финальной фокусировки коллайдера возможно компенсировать смещение магнитной оси от номинального положения. Таким образом, при моделировании замкнутой орбиты с учетом результатов измерений смещение данных магнитов принимается равным нулю. При юстировке двухапертурных магнитов нет возможности корректировать положение каждого магнита в модуле. Для данных магнитов вертикальное смещение задается как среднее значение между

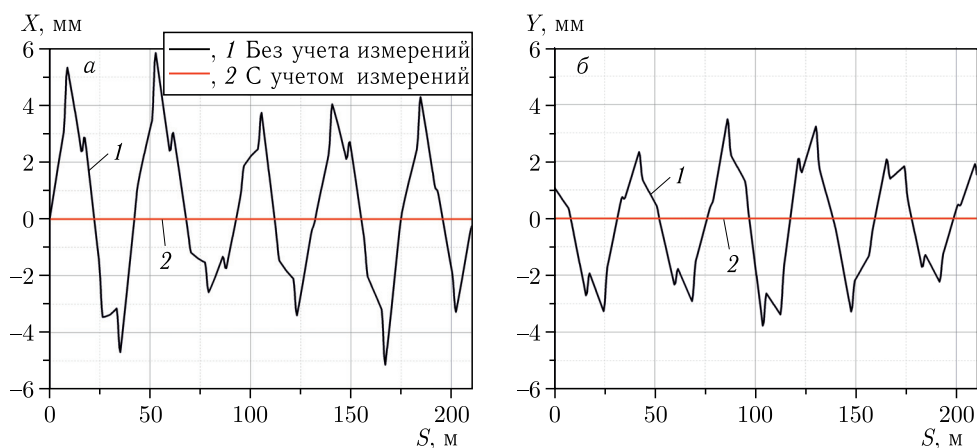


Рис. 4. Результаты моделирования влияния измеренных смещений магнитной оси дублетов квадрупольных магнитов на горизонтальную (а) и вертикальную (б) замкнутые орбиты пучка в бустере NICA

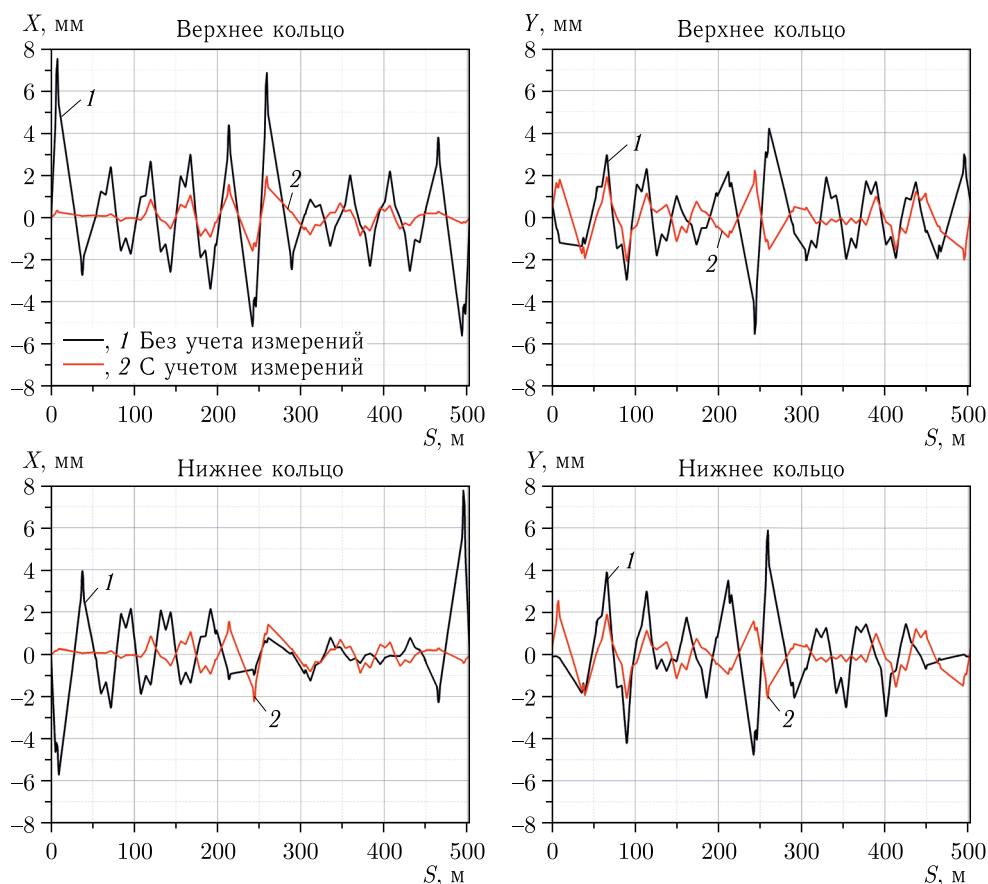


Рис. 5. Результаты моделирования влияния измеренных смещений магнитной оси квадрупольных магнитов на горизонтальную (слева) и вертикальную (справа) замкнутые на орбиты пучка в коллайдере NICA

отклонениями оси во всех магнитах модуля. Смещение по горизонтальной оси может быть скомпенсировано, однако при этом возникает поворот модуля вокруг продольной оси в системе координат модуля в случае, если смещения в верхней и нижней апертурах различны по направлению. При моделировании данный угол также учитывался.

Результаты моделирования замкнутой орбиты пучка показывают, что учет измеренных положений магнитной оси квадрупольных магнитов при их юстировке в кольцах бустера и коллайдера позволяет уменьшить амплитуду возмущения орбиты. Для бустера результаты моделирования показывают снижение амплитуды возмущений в пределах 6 мм, для коллайдера — 4 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках производства сверхпроводящих магнитов бустера и коллайдера NICA в ЛФВЭ ОИЯИ была разработана и создана система измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов на основе метода вибрирующей струны. При помощи

данной магнитометрической системы положение магнитной оси было определено для 24 модулей квадрупольных магнитов бустера и 70 модулей коллайдера. Результаты измерений использованы при юстировке магнитооптических систем ускорителей.

Проведено моделирование и дана оценка амплитуд возмущений замкнутой орбиты, вызываемых смещениями магнитной оси квадрупольных магнитов от теоретической замкнутой орбиты пучка. Учет результатов измерений положения магнитной оси при юстировке магнитов позволяет снизить амплитуду возмущений орбиты в пределах 6 мм для бустера и 4 мм для коллайдера по результатам моделирования, что подчеркивает актуальность таких измерений при производстве квадрупольных магнитов.

Разработанная магнитометрическая система позволяет реализовать ряд струнных методик для измерений интегральных характеристик магнитного поля. Система является универсальной и может быть использована для измерений различных типов магнитов. Ведется активная модернизация программно-аппаратного функционала системы измерений для внедрения новых струнных методик [9].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко А. В. и др. Статус комплекса NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3(254). С. 248–256.
2. Khodzhbagiyani H. et al. Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Complex in Dubna // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 3. P. 1795–1798.
3. Shemchuk A. V. et al. Serial Magnetic Measurements of Quadrupole Magnets of the NICA Booster Synchrotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15, No. 7(219). P. 845.
4. Золотых Д. А. и др. Серийные магнитные измерения структурных квадрупольных магнитов коллайдера NICA // ПТЭ. 2024. № 8.
5. Wolf Z. A Vibrating Wire System for Quadrupole Fiducialization // SLAC TN. 2010. V. 10. P. 087.
6. Parfyo T. et al. Vibrating Wire System for Fiducialization NICA Booster Superconducting Quadrupole Magnets // Proc. 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RUPAC'21), Alushta, Russia, Sept. 26 – Oct. 2, 2021. No. 27. Geneva: JACoW Publ., 2021. P. 12–16; doi:10.18429/JACoW-RUPAC2021-WEPSC17; <http://jacow.org/rupac2021/papers/wepsc17.pdf>.
7. Николайчук И. Ю. и др. Статус измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Сиб. физ. журн. 2024. Т. 19, № 1. С. 68–79.
8. Николайчук И. Ю. и др. Первые измерения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 6(251). С. 1463–1469.
9. Николайчук И. Ю. Методика калибровки струнного измерительного стенда и методы подавления систематических ошибок измерений параметров магнитного поля // ЭЧАЯ. 2025. Т. 56, вып. 3. С. 1257–1265.
10. <https://uspas.fnal.gov/resources/downloads.shtml>

Получено 28 октября 2024 г.