Научная статья

УДК 621.317.421.2
DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-68-79

Статус измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA*

Илья Юрьевич Николайчук[1], Владимир Владимирович Борисов Олег Михайлович Голубицкий, Дмитрий Александрович Золотых Богдан Кондратьев

Объединенный институт ядерных исследований
Дубна, Россия

[1]nikolajchuk@jinr.ru

Аннотация

В рамках реализации мегапроекта NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) в Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) проводится сборка магнито-криостатной системы коллайдера. Структурными единицами магнито-оптической структуры коллайдера являются 88 дипольных и 82 квадрупольных магнита различной конфигурации. С целью повышения точности юстировки квадрупольных магнитов на теоретическую замкнутую орбиту пучка в коллайдере необходимо измерить положение магнитной оси в системе координат магнита. Для проведения таких измерений в ЛФВЭ используется вибрационная струнная методика. Новая измерительная система, реализующая такую методику, разработана и введена в эксплуатацию в ЛФВЭ. Система работает при температуре окружающей среды и позволяет измерять положение магнитной оси с точностью ±0,053 мм. В статье приведена конструкция магнитометрической системы, сделана оценка точности и представлены текущие результаты измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA.

Ключевые слова

NICA, квадрупольный магнит, магнитная ось, вибрационная струнная методика, магнитометрическая система

Для цитирования

Николайчук И. Ю., Борисов В. В., Голубицкий О. М., Золотых Д. А., Кондратьев Б. Статус измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 68–79. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-68-79

---

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

© Николайчук И. Ю., Борисов В. В., Голубицкий О. М., Золотых Д. А., Кондратьев Б., 2024

The State of Magnetic Axis Measurement of the Nica Collider Quadrupoles

Ilia Yu. Nikolaichuk1, Vladimir V. Borisov
Oleg M. Golubitsky, Dmitry A. Zolotykh
Bogdan Kondratiev

Joint Institute for Nuclear Research,
Dubna, Russian Federation

[1]nikolajchuk@jinr.ru

Abstract

As part of the NICA megascience project the magnetic-cryostat system of the superconducting Collider is being assembled. The structural units of the Collider are 88 dipole and 82 quadrupole magnets of various configuration. In order to improve the accuracy of alignment of quadrupole magnets to the theoretical closed orbit of the beam in the Collider, it is necessary to measure the position of the magnetic axis in the coordinate system of the magnet. Vibration wire technique is used to perform such measurements in VBLHEP. The system operates at ambient temperature and allows measuring the position of the magnetic axis with an accuracy of ±0.053 mm. The article presents the design of the magnetic measurement system, an accuracy assessment is made and the current results of measurements of the position of the magnetic axis of the NICA Collider quadrupole magnets.

Keywords

NICA, quadrupole, magnetic axis, vibrating wire technique, magnetic measurement system

For citation

Nikolaichuk I. Yu., Vorisov V. V., Golubitsky O. M., Zolotykh D. A., Kondratiev B.. The state of magnetic axis measurement of the NICA collider quadrupoles. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 68–79 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-68-79

Введение

Ускорительный комплекс NICA состоит из коллайдера и инжекционной цепочки ускорителей. Инжекционный комплекс введен в эксплуатацию в 2022 г. и успешно прошел четыре сеанса пусконаладочных работ. Готовность основных узлов коллайдера составляет более 80 % [1].

Магнито-криостатная система коллайдера состоит из 88 дипольных магнитов и 82 квадрупольных магнитов – 46 двухапертурных магнитов в арках, 12 двухапертурных дублетов и 12 одноапертурных магнитов финальной фокусировки. Все магниты изготавливаются и проходят испытания в ЛФВЭ ОИЯИ. Положение магнитной оси определяется для каждого магнита в модуле в системе координат модуля.

Измерение положения магнитной оси производится специально разработанной магнитометрической системой, основанной на вибрационной струнной методике. Методика заключается в регистрации механических колебаний натянутой струны, вызываемых силой Лоренца, возникающей при протекании переменного тока по струне, натянутой в статическом поле измеряемого магнита [2]. Критерием приближения струны к магнитной оси служит уменьшение амплитуды ее колебаний. Изменяя пространственное положение струны в апертуре магнита, можно определить магнитную ось как положение, при котором колебания струны минимальны.

Квадрупольный магнит коллайдера NICA

В сверхпроводящей магнитной системе коллайдера используются магниты с полем, формируемым железным ярмом, аналогичные по конструкции магнитам нуклотрона [3]. Данные магниты состоят из ярма типа «оконная рама» и обмотки, изготавливаемой из «трубчатого» сверхпроводящего кабеля на основе сплава Nb-Ti. Магниты охлаждаются двухфазным потоком

гелия до рабочей температуры 4,5 К. Как дипольные, так и квадрупольные магниты имеют возможность неоднократной сборки и замены составляющих элементов.

Максимальная величина индукции магнитного поля в магнитах составляет 1,8 Тл. Величина максимального рабочего тока составляет 10,44 кА.

Магнитометрическая система

Система измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA разработана, собрана и введена в эксплуатацию. Схема измерительной системы представлена на рис. 1.

Струна из бериллиевой бронзы диаметром 0,125 мм и длиной ~3 м (длина варьируется в зависимости от типа измеряемого магнита) протягивается через апертуру магнита (см. рис. 1, поз. 2) и перемещается двумя парами сервомоторов (см. рис. 1, поз. 4) в вертикальной и горизонтальной плоскостях [4]. Для измерений положения магнитной оси геометрический центр магнита должен находиться на ¼ длины струны [5]. Струна закреплена на трансляторах и натянута с усилием 10 Н. Для контроля натяжения разработана специальная система автоматического натяжения (см. рис. 1, поз. 5), состоящая из шагового двигателя и тензодатчика.

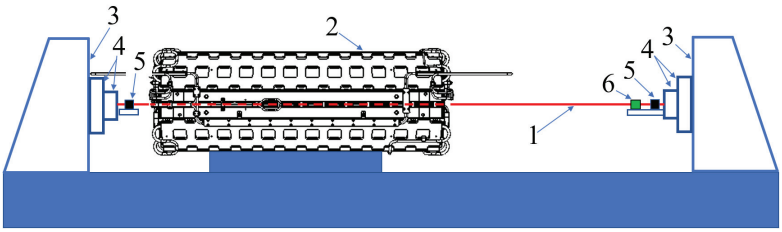

Рис. 1. Схема измерительной системы:
1 – струна; *2* – квадрупольный магнит; *3* – стойки поддержки основных узлов системы;
4 – система перемещения струны; *5* – система натяжения струны; *6* – система регистрации колебаний
Fig. 1. Measuring system setup:
1 – wire; *2* – quadrupole magnet; *3* – racks for supporting the main components of the system;
4 – movement system; *5* – tension system; *6* – vibration measurement system

Система регистрации колебаний

Система регистрации колебаний струны состоит из двух оптопар GP1S094HCZ0F [6], расположенных ортогонально, и линейных платформ для их автоматического перемещения (рис. 2, *а*).

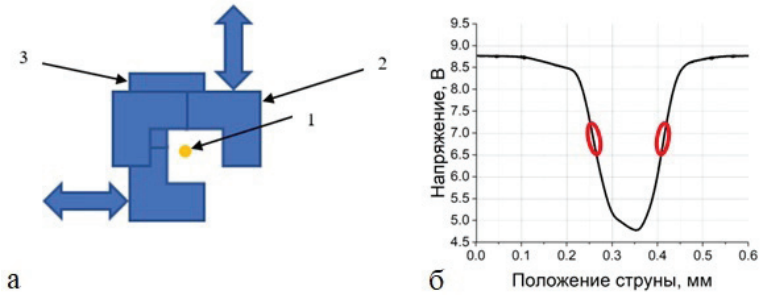

Рис. 2. Схема системы регистрации колебаний струны:
1 – струна; *2* – оптопара для регистрации вертикальных колебаний; *3* – оптопара для регистрации горизонтальных колебаний (*а*); зависимость напряжения на выходе оптопары от положения струны (*б*)
Fig. 2. Vibration measurement system setup: *1* – wire, *2* – optocouple for vertical vibration, *3* – optocouple for horizontal vibration (*a*); dependence of voltage at the optocouple output on the string position (*б*)

Оптопара состоит из инфракрасного светодиода и фототранзистора, разделенных промежутком в 3 мм. При попадании струны в промежуток напряжение на выходе оптопары снижается в зависимости от перекрытия струной светового потока светодиода. Зависимость напряжения на фототранзисторе от положения струны показана на рис. 2, *б*. Красным выделена рабочая область детектирования колебаний струны. Рабочая область выбирается эмпирически по средней величине напряжения между позициями максимального и минимального перекрытия светового потока светодиода. Это необходимо для сохранения линейной зависимости между амплитудой колебаний струны и напряжением на выходе оптопары.

Система перемещения оптопар автоматически изменяет положение оптопар относительно струны для сохранения линейной области работы. Выход струны из рабочей области связан с ее перемещением при измерениях.

Проведение измерений

Магнитные измерения

После подготовки системы к измерениям в первую очередь находится резонансная частота собственных колебаний струны [5]. Для этого измеряется зависимость амплитуды колебаний струны от частоты переменного тока в ней.

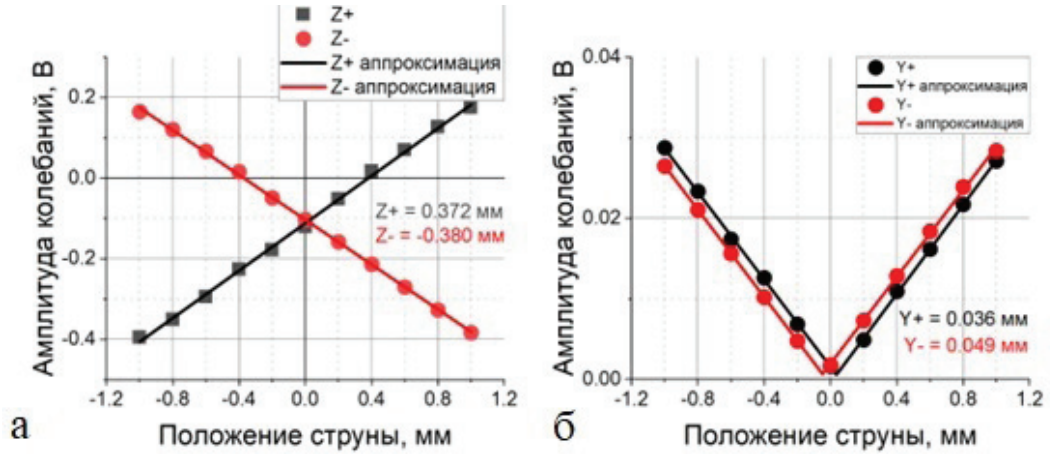

Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний струны от положения при измерении положения магнитного центра (*а*) и при измерении угловых положений магнитной оси (*б*)

Fig. 3. Amplitude of the wire vibration vs position when measuring magnetic center (*a*) and when measuring angle position of magnetic axis (*б*)

После нахождения резонансной частоты производятся измерения положения магнитного центра. Магнитный центр – это точка пересечения магнитной оси с поперечной плоскостью магнита в его геометрическом центре. Частота переменного тока в струне устанавливается кратной резонансной частоте собственных колебаний. Кратность определяется продольным положением магнита (½ или ¼ длины струны). Измерения проводятся в двух полярностях тока питания магнита для вычета вклада внешних магнитных полей и остаточной намагниченности. Концы струны перемещаются сонаправлено в одной из измеряемых плоскостей (вертикальной или горизонтальной). Область измерений и шаг задаются оператором в программе управления. По измеренным точкам производится построение зависимостей амплитуды колебаний от положения струны. Зависимость амплитуды колебаний струны от величины магнитного поля является линейной, что позволяет аппроксимировать измеренные точки линейной

функцией. Магнитным центром при измерениях принимается точка пересечения построенных зависимостей (рис. 3, *а*).

После определения положения магнитного центра измеряются угловые положения магнитной оси в вертикальной (Pitch) и горизонтальной (Yaw) плоскостях. Для этого точки крепления струны перемещаются в противоположных направлениях так, чтобы положение струны в центре магнита оставалось неизменным.

Измерения также проводятся в двух полярностях. Измеряемые зависимости аппроксимируются кривой вида $y = |x|$ (рис. 3, *б*). Угловым положением магнитной оси принимается среднее между измерениями в двух полярностях.

Геометрические измерения

После выставления струны в магнитную ось необходимо перенести координаты струны в систему координат магнита. Для построения системы координат используются реперные отверстия на ярме магнита (рис. 4).

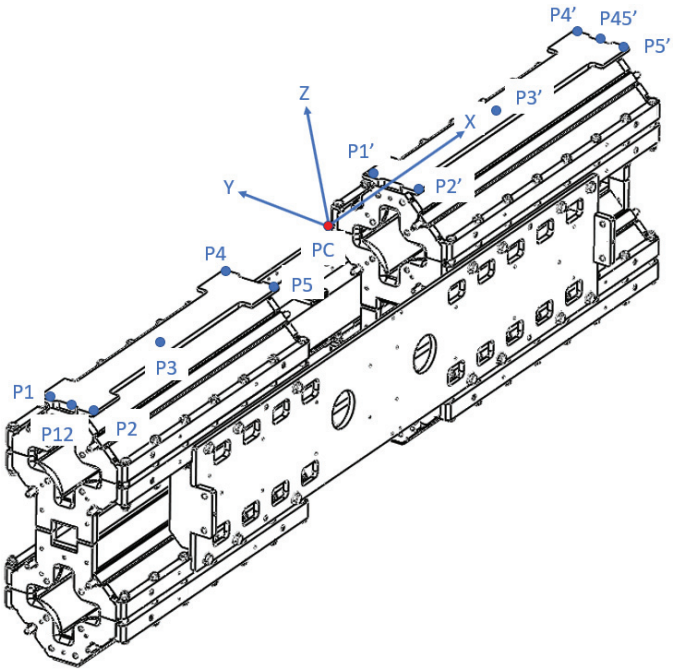

Рис. 4. Система координат двухапертурного дублета квадрупольных магнитов
Fig. 4. Coordinate system of twin-aperture doublet of quadrupole magnet

Измерение реперных точек магнита и положения струны производится координатно-измерительной машиной [7].

Программное обеспечение

Программное обеспечение для проведения измерений разработано в среде LabVIEW 2020 [8]. Созданное ПО позволяет проводить измерения в полуавтоматическом режиме с возможностью удаленного управления и мониторинга. В программе управления реализованы автоматический поиск резонансной частоты колебаний струны и поиск положения магнитной оси (рис. 5).

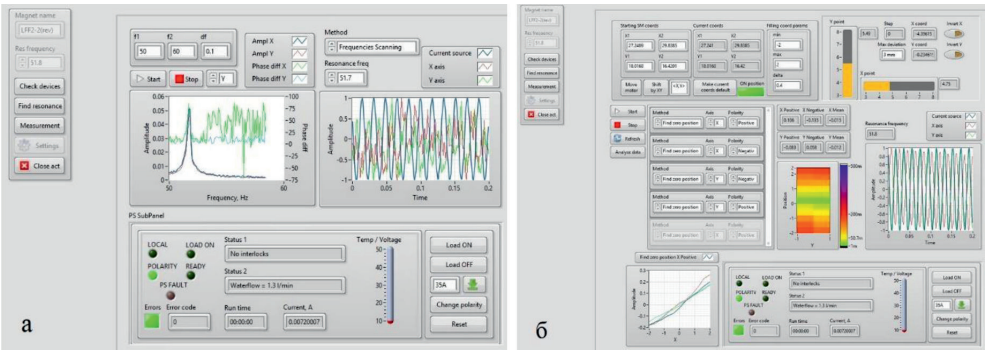

Рис. 5. Интерфейс пользователя программного обеспечения для измерений резонансной частоты колебаний струны (*а*) и поиска положения магнитной оси (*б*)
Fig. 5. Software user interface for measuring resonance frequency (*a*) and find position of magnetic axis (*б*)

Оценка точности измерений

Стандартная ошибка измерений складывается из точности магнитных измерений и точности координатно-измерительной машины при переносе координат струны в систему координат магнита. Точность магнитных измерений может быть оценена по ошибке аппроксимации экспериментальных данных (рис. 6–7) и повторяемости измерений (рис. 8–9).

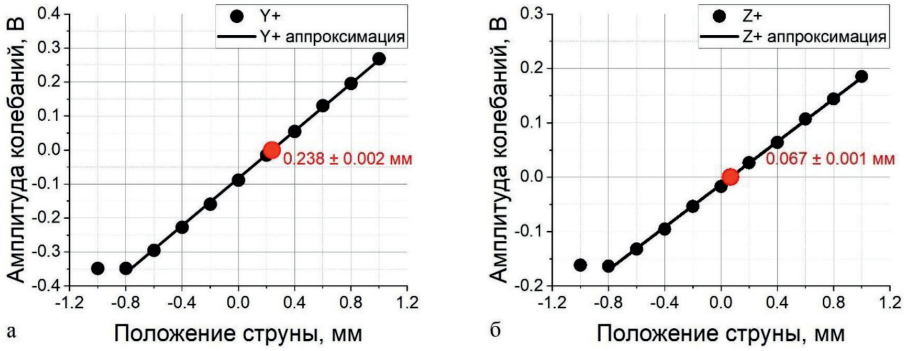

Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний от перемещения струны при измерении положения магнитного центра в горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) плоскостях
Fig. 6. Amplitude of the wire vibration vs position when measuring magnetic center in horizontal (*a*) and vertical (*б*) planes

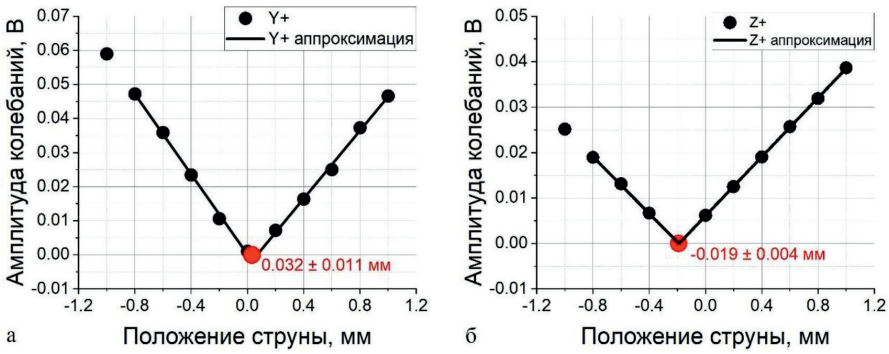

Рис. 7. Зависимость амплитуды колебаний от перемещения струны при измерении угловых положений магнитной оси в горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) плоскостях
Fig. 7. Amplitude of the wire vibration vs position when measuring angle position of magnetic axis in horizontal (*a*) and vertical (*б*) planes

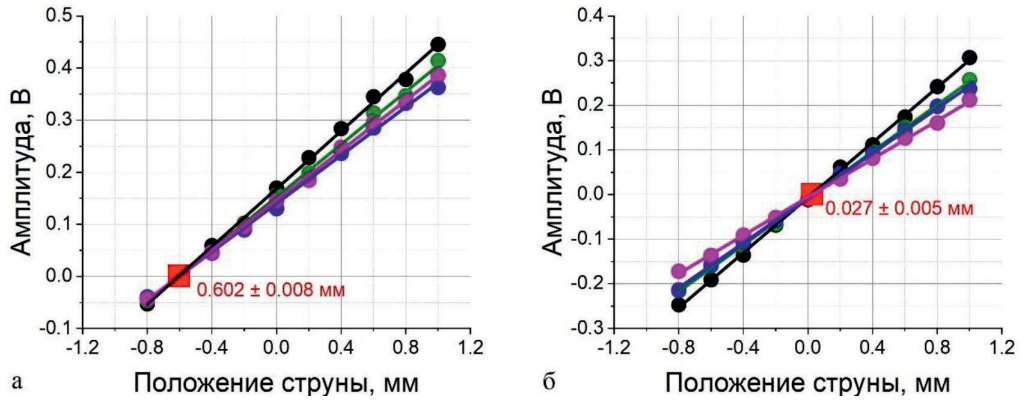

Рис. 8. Повторяемость измерений положения магнитного центра в горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) плоскостях

Fig. 8. Measurement repeatability of magnetic center in horizontal (*a*) and vertical (*б*) planes

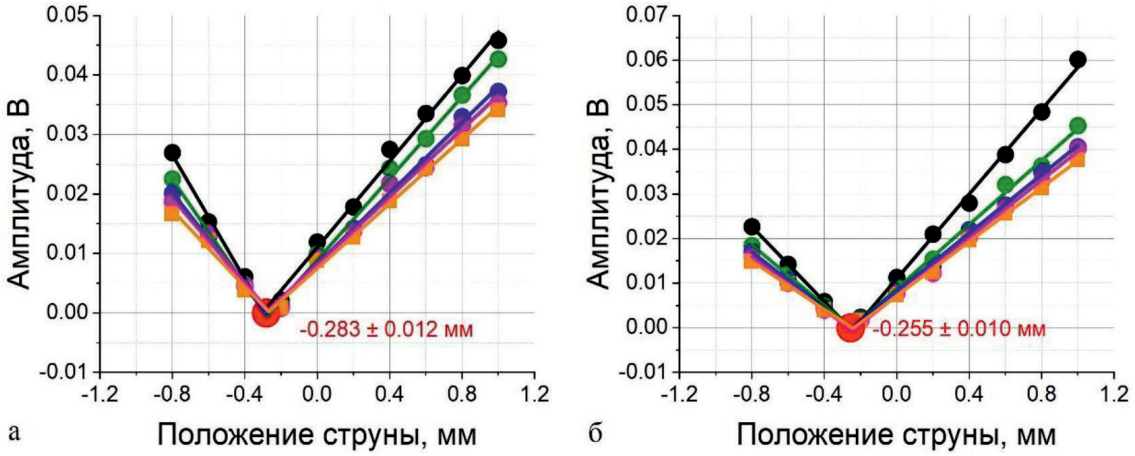

Рис. 9. Повторяемость измерений угловых положений магнитной оси в горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) плоскостях

Fig. 9. Measurement repeatability of angle positions of magnetic axis in horizontal (*a*) and vertical (*б*) planes

Ошибка привязки положения струны к системе координат определяется пространственной точностью измерений координатно-измерительной машины (± 0,051 мм). Для оценки повторяемости была проведена серия из 7 измерений положения магнитного центра (M) и угловых положений (Pitch, Yaw). Результаты представлены в таблице.

Результаты измерений

На текущий момент положение магнитной оси измерено для всех двухапертурных магнитов и дублетов. Основные результаты измерений приведены на рис. 10–15.

Повторяемость геометрических измерений

Geometric measurements repeatability

№	M_y, мм	M_z, мм	Pitch, мрад	Yaw, мрад
1	0,05	–242,01	–0,33	–0,04
2	0,00	–242,11	–0,35	–0,03
3	0,06	–242,09	–0,37	–0,03
4	0,04	–242,09	–0,36	–0,03
5	0,02	–242,12	–0,35	–0,03
6	–0,01	–242,12	–0,34	–0,03
7	0,03	–242,08	–0,32	–0,03
Ср. знач.	0,03	–242,09	–0,35	–0,03
Ст. откл.	0,03	0,04	0,02	0,01

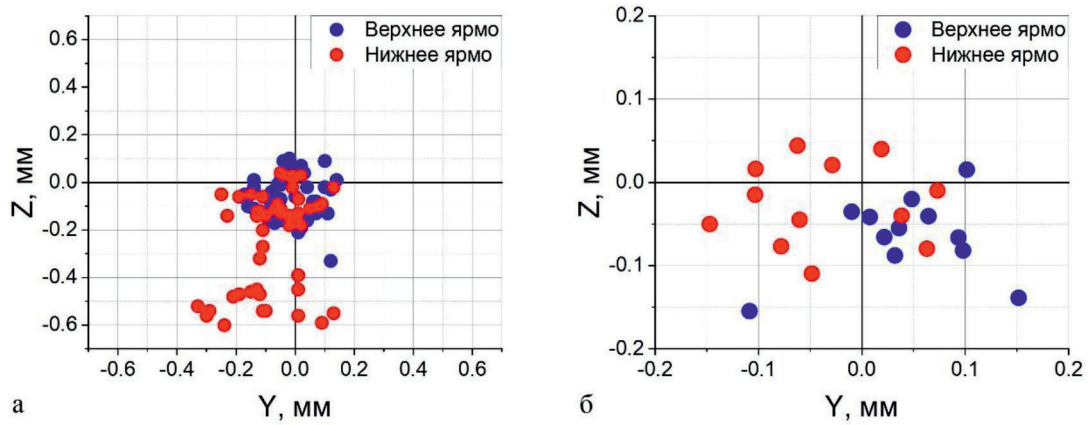

Рис. 10. Положения магнитных центров квадрупольных магнитов арки (*а*) и дублетов (*б*)
Fig. 10. Positions of magnetic center of arch quadrupole magnets (*a*) and doublets (*б*)

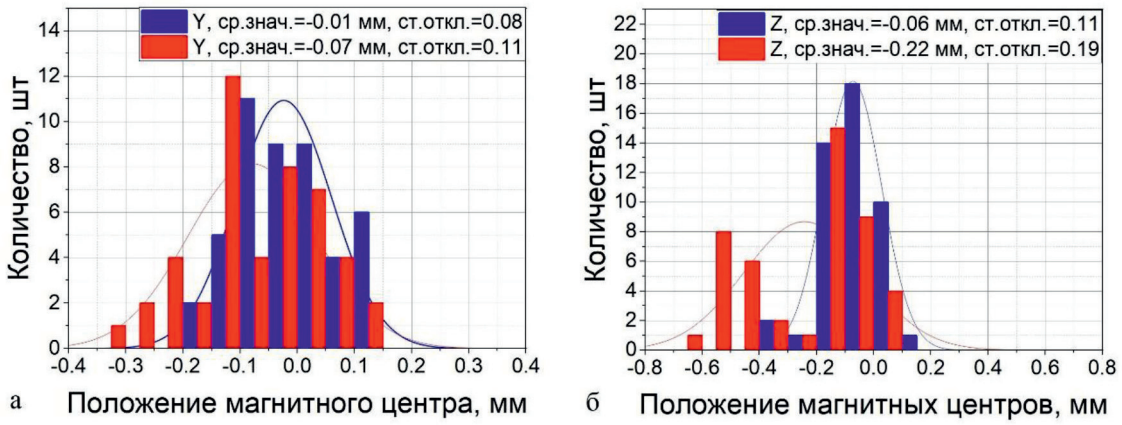

Рис. 11. Распределения положений магнитных центров квадрупольных магнитов арки в горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) плоскостях
Fig. 11. Distributions of magnetic center positions in arch quadrupoles in horizontal (*a*) and vertical (*б*) planes

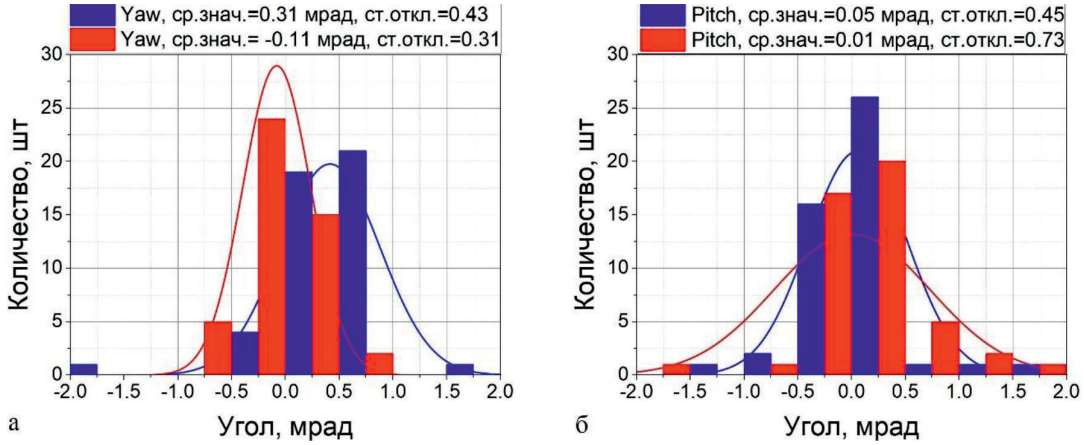

Рис. 12. Распределения угловых положений магнитной оси квадрупольных магнитов арки в горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) плоскостях

Fig. 12. Distributions of angle positions of magnetic axis in arch quadrupoles in horizontal (*a*) and vertical (*б*) planes

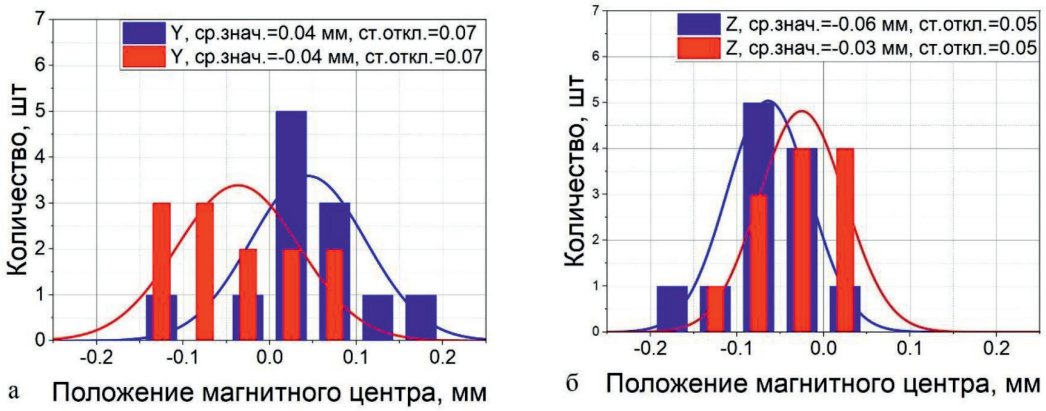

Рис. 13. Распределения положений магнитных центров двухапертурных дублетов в горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) плоскостях

Fig. 13. Distributions of magnetic center positions in twin-aperture doublets in horizontal (*a*) and vertical (*б*) planes

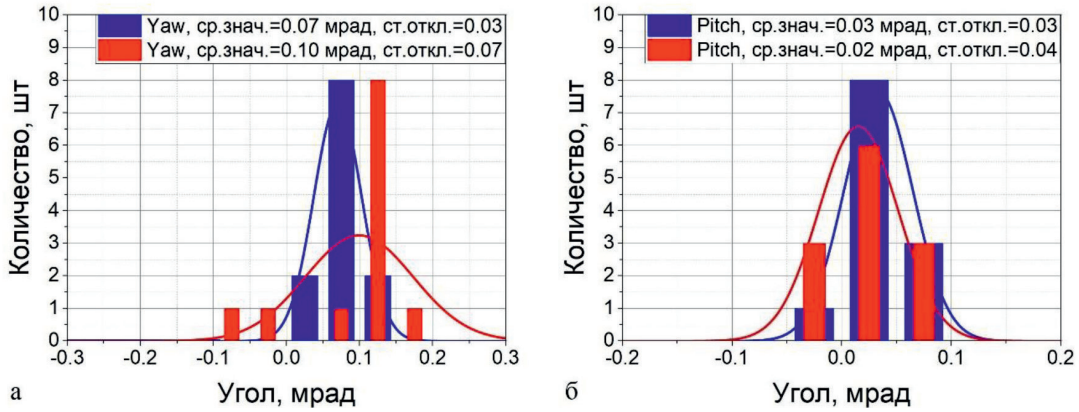

Рис. 14. Распределения угловых положений магнитной оси двухапертурных дублетов в горизонтальной (*а*) и вертикальной (*б*) плоскостях

Fig. 14. Distributions of angle positions of magnetic axis in twin-aperture doublets in horizontal (*a*) and vertical (*б*) planes

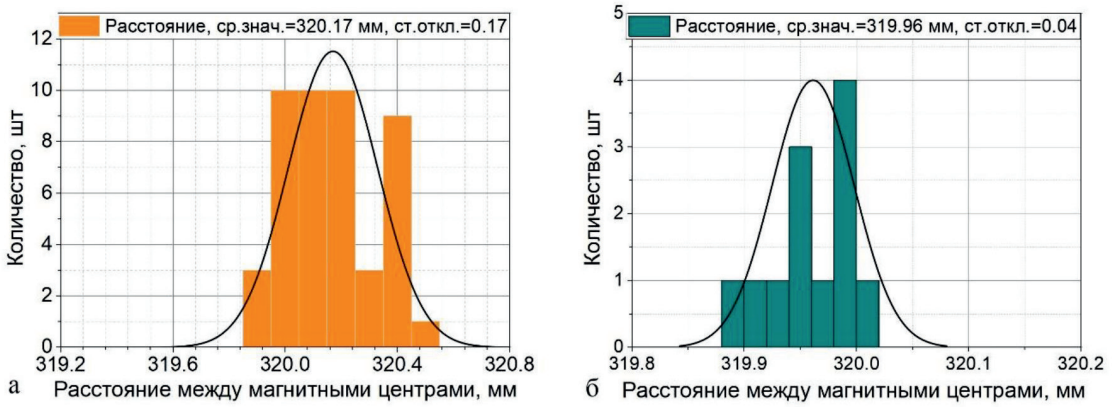

Рис. 15. Расстояния между магнитными центрами квадрупольных магнитов арки (*а*) и дублетов (*б*)
Fig. 15. Distance between magnetic centers in arch quadrupoles (*a*) and doublets (*б*)

Положения магнитных центров и углов приведены как отклонения от геометрической оси магнита. Результаты измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов арок показывают наличие разброса положений магнитной оси, превышающего точность магнитометрической системы. Это объясняется отклонением в магнитных свойствах материалов лобовых пластин, что также было замечено при измерениях интеграла магнитного поля [9].

Заключение

Методика вибрирующей струны является высокоточным методом измерений положения магнитной оси. Данный метод был успешно применен при измерениях положения магнитной оси дублетов квадрупольных магнитов бустерного синхротрона комплекса NICA [10]. Полученный опыт был учтен при разработке измерительного стенда для квадрупольных магнитов коллайдера.

Оценка точности измерений положения магнитной оси показывает, что в данной конфигурации магнитометрической системы и координатно-измерительной машины точность достигает ±0,053 мм. Основной вклад в погрешность измерений положения магнитной оси вносит точность измерений координатно-измерительной машины. Повышение точности измерений возможно при использовании координатно-измерительной машины с лучшей точностью определения пространственного положения точек. В дальнейшем предполагается реализация в созданной измерительной системе других методик измерений магнитного поля при помощи струны [11; 12].

Список литературы

1. **Козлов О. С. и др.** Актуальные задачи исследования динамики пучка в коллайдере NICA // ЭЧАЯ. 2022. Т. 53, № 5. С. 1220–1273.
2. **Wolf Z.** A vibrating wire system for quadrupole fiducialization // SLAC TN 10 087. 2010.
3. **Khodzhibagiyan H., Smirnov A.** The Concept of a Superconducting Magnet System for the Nuclotron // Proc. of Conf. ©ICIC 12. Southampton, 2012.
4. **Николайчук И. Ю. и др.** Первые измерения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 6 (251). С. 1463–1469.
5. **Temnykh A.** The Magnetic Center Finding using Vibrating Wire Technique. Preprint CBN 99-22.
6. Reference manual. GP1S094HCZ0F Compact Transmissive Photointerrupter. SHARP Corporation, 2005.

7. Romer Absolute Arm advanced portable 3D measurement. Hexagon AB, 2017.
8. Upgrading LabVIEW. National Instruments Corporation, 2023.
9. **Золотых Д. А. и др.** Серийные магнитные измерения структурных квадрупольных магнитов коллайдера NICA // XXVIII International Conference Russian Particle Accelerators Conference RuPAC'23. Novosibirsk, Russia, 2023.
10. **Parfylo T. et al.** Vibrating wire system for fiducialization NICA Booster superconducting quadrupole magnets // *Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf.* (RUPAC'21). Alushta, Russia, 2021. P. 379–382. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC17
11. **Petrone C.** Wire methods for measuring field harmonics, gradients and magnetic axes in accelerator magnets. PhD Thesis, CERN-THESIS-2013-130, 2013.
12. **Le Bec G.** Stretched wire measurement of multipole accelerator magnets // Physical review special topics. 2012. T. 15, № 022401. P. 1–14.

References

1. **Kozlov O. S. et al.** Actual Tasks of Beam Dynamics Analysis in the NICA Collider. *PEPAN*, 2022, vol. 53, № 5, pp. 1220–1273. (in Russ.)
2. **Wolf Z.** A vibrating wire system for quadrupole fiducialization. SLAC TN 10 087, 2010.
3. **Khodzhibagiyan H., Smirnov A.** The Concept of a Superconducting Magnet System for the Nuclotron. *Proc. of Conf. ©ICIC 12*, Southampton, 2012.
4. **Nikolaichuk I. Yu. et al.** First Measurements of the Magnetic Axis of Quadrupole Magnets for the NICA Collider. *PEPAN Letters*, 2023, vol. 20, № 6(251), pp. 1425-1428. (in Russ.)
5. **Temnykh A.** The Magnetic Center Finding using Vibrating Wire Technique. Preprint CBN 99-22.
6. Reference manual. GP1S094HCZ0F Compact Transmissive Photointerrupter. SHARP Corporation, 2005.
7. Romer Absolute Arm advanced portable 3D measurement. Hexagon AB, 2017.
8. Upgrading LabVIEW. National Instruments Corporation, 2023.
9. **Zolotykh D. A. et al.** Serial magnetic measurements of the NICA Collider regular quadrupoles. *XXVIII International Conference Russian Particle Accelerators Conference RuPAC'23*, Novosibirsk, Russia, 2023. (in Russ.)
10. **Parfylo T. et al.** Vibrating wire system for fiducialization NICA Booster superconducting quadrupole magnets. In *Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf.* (RUPAC'21), Alushta, Russia, 2021, pp. 379–382. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC17
11. **Petrone C.** Wire methods for measuring field harmonics, gradients and magnetic axes in accelerator magnets. PhD Thesis, CERN-THESIS-2013-130, 2013.
12. **Le Bec G.** Stretched wire measurement of multipole accelerator magnets. *Physical Review Special Topics*, 2012, vol. 15, № 022401, pp. 1–14.

Сведения об авторах

Николайчук Илья Юрьевич, инженер

Борисов Владимир Владимирович, начальник сектора

Голубицкий Олег Михайлович, ведущий инженер

Золотых Дмитрий Александрович, старший инженер

Кондратьев Богдан, старший инженер

Information about the Authors

Ilia Yu. Nikolaichuk, Engineer

Vladimir V. Borisov, Head of Sector

Oleg M. Golubitsky, Principal Engineer

Dmitry A. Zolotykh, Senior Engineer

Bogdan Kondratiev, Senior Engineer

Статья поступила в редакцию 08.09.2023;
одобрена после рецензирования 11.12.2023; принята к публикации 04.03.2024

The article was submitted 08.09.2023;
approved after reviewing 11.12.2023; accepted for publication 04.03.2024