

ПЕРВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ОСИ КВАДРУПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ КОЛЛАЙДЕРА NICA

И. Ю. Николайчук¹, В. В. Борисов, Д. Н. Никифоров, Д. И. Храмов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В рамках реализации мегапроекта NICA в Лаборатории физики высоких энергий проводится сборка магнитокриостатной системы коллайдера. Структурными единицами коллайдера являются 70 квадрупольных магнитов (46 арочных, 12 блоков линз прямолинейного участка, а также 12 линз финального фокуса). Для точной юстировки этих магнитов по орбите пучка в коллайдере отклонение магнитной оси от геометрической должно быть определено с точностью не хуже $\pm 0,1$ мм. Вибрационная струнная методика позволяет определить положение магнитной оси в системе координат магнита с необходимой точностью. Разработана и введена в эксплуатацию новая измерительная система для работ при температуре окружающей среды. Приведены конструкция стенда и результаты измерений положения магнитной оси.

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 70 quadrupole magnets (46 arched, 12 lens blocks and 12 final focus lenses). To correctly align these magnets in the collider lattice, the position of the magnetic axis must be determined with ± 0.1 mm accuracy. Vibration wire techniques are used to achieve the required measurement accuracy. A new measuring system operating at ambient temperature was developed and assembled for the measurement by these methods. The design of the stand and results of measurements of the magnetic axis position are presented.

PACS: 07.55.Ge; 07.05.Kf; 29.20.db; 25.75.–q

ВВЕДЕНИЕ

Ускорительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1] базируется на использовании сверхпроводящего (СП) синхротрона нуклотрон, бустерного синхротрона (бустера) и СП-коллайдера, обеспечивающего накопление протонов и ионов и их столкновение в двух точках встречи, где будут располагаться детекторы MPD и SPD. В настоящее время происходит сборка и ввод в эксплуатацию заключительных частей комплекса NICA. Так, бустер запущен в конце 2020 г. Готовность узлов коллайдера составляет более 80 %.

¹E-mail: nikolajchuk@jinr.ru

Основными структурными элементами коллайдера являются 86 дипольных и 70 квадрупольных магнитов — 46 магнитов в арках, 12 блоков «линз» прямолинейного участка и 12 «линз» финальной фокусировки пучка. Все магниты изготавливаются в научно-экспериментальном отделе сверхпроводящих магнитов и технологий ЛФВЭ ОИЯИ.

Одним из основных параметров квадрупольного магнита является положение магнитной оси в системе координат магнита. Для его определения используется метод вибрирующей струны, основанный на изменении амплитуды вибраций струны под действием силы Лоренца, возникающей между движущимися зарядами в струне и поперечным магнитным полем. В случае, если частота тока в струне близка к одной из резонансных частот колебаний струны, этот эффект усиливается. Положение магнитной оси можно определить, построив зависимости амплитуды колебаний от перемещения струны в вертикальной и горизонтальной плоскостях [3].

КВАДРУПОЛЬНЫЙ МАГНИТ КОЛЛАЙДЕРА

Квадрупольные магниты коллайдера — двухапертурные магниты типа нуклотрон включают в себя железное ярмо, формирующее магнитное поле, и СП-обмотки, выполненные из трубчатого СП-кабеля [2]. Основные параметры магнита приведены в таблице.

Основные параметры квадрупольного магнита арочного типа

Параметр	Значение
Количество магнитов, шт.	70
Максимальный градиент магнитного поля, Тл/м	23
Эффективная длина, м	0,46
Апертура пучковой камеры (г/в), мм	120/70
Расстояние между осями пучков, м	0,32
Рабочий ток (4,5 ГэВ/нуклон), кА	10,4

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерительная система положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA была разработана, смонтирована и введена в эксплуатацию в ЛФВЭ.

Медно-бериллиевая струна диаметром 0,125 мм и длиной 3 м протягивается через апертуру магнита (рис. 1, поз. 2 — модуль линз) и перемещается двумя парами сервомоторов (рис. 1, поз. 3) в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Геометрический

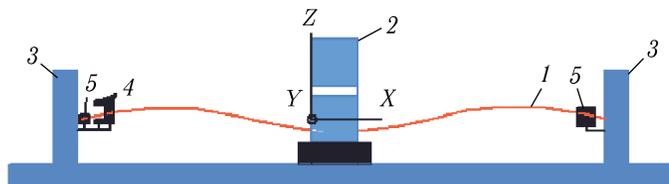


Рис. 1. Схема измерительной системы: 1 — струна; 2 — модуль квадрупольных магнитов; 3 — стойки поддержки основных узлов системы; 4 — фототранзисторы; 5 — система натяжения

центр магнита находится на 1/2-й длины струны. Струна закреплена на трансляторах и натянута с усилием 10 Н с помощью системы натяжения (рис. 1, поз. 5), состоящей из шагового двигателя и тензодатчика. Подача синусоидального переменного тока на струну осуществляется с цифрового генератора. Определение амплитуды колебания струны происходит с двух ортогональных фототранзисторов, сигнал с которых оцифровывается при помощи модуля АЦП.

Измерение координат положения струны производится по 4 реперным точкам (по 2 на каждом из трансляторов) в системе координат магнита. Для определения их смещений от действительного положения струны проводится калибровка, которая заключается в касании струной калибровочной сферы диаметром 25,004 мм и замера координат положений реперных точек в каждой точке касания. Затем строятся окружности по точкам, пройденным каждым из реперов. Между центрами соответствующих реперов проводятся параллельные прямые и высчитывается расстояние между центром сферы и прямой с учетом величины провисания струны (для вертикальной координаты). Заключение о параллельности прямых делается на основе измерений взаиморасположения гранитных стоек поддержки и трансляторов (не хуже ± 6 мкм).

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для поиска положения магнитного центра используется третья гармоника резонансной частоты струны, для нахождения углового положения магнитной оси — четвертая.

При поиске пересечения струной магнитной оси в центре магнита — положения магнитного центра, амплитуда колебаний струны измеряется в 11 точках в диапазоне 2 мм от предполагаемого центра с шагом 0,2 мм (рис. 2). Трансляторы движутся сонаправленно. Амплитуда переменного тока через струну равна 0,1 А, постоянный ток питания обмотки магнита — 65 А. Для исключения влияния внешних магнитных полей измерения проводятся в положительной и отрицательной полярности питания

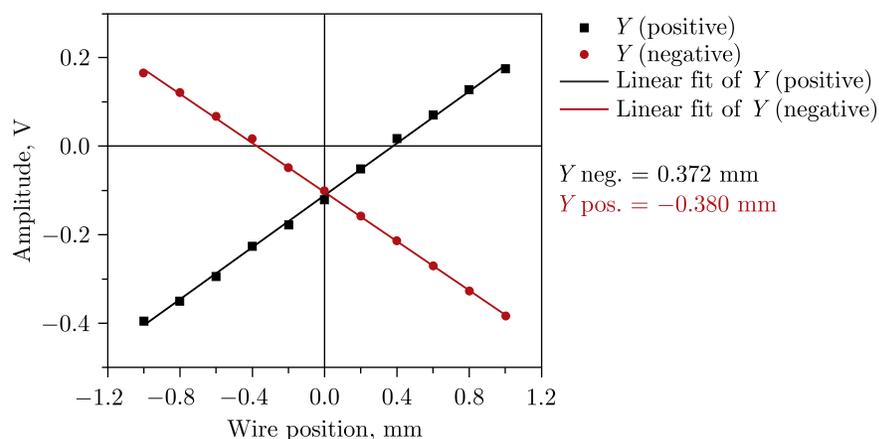


Рис. 2. Положение магнитного центра по оси Y

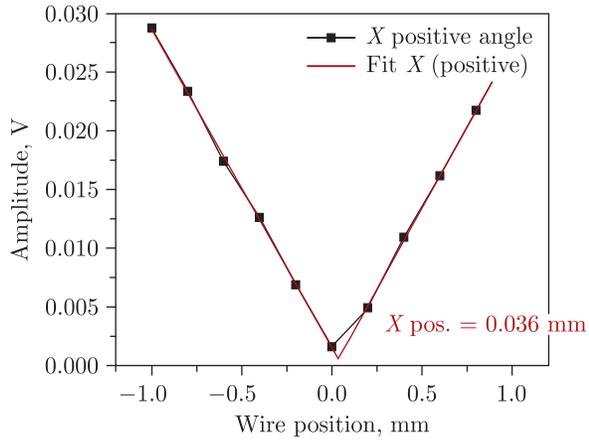


Рис. 3. Угловое положение магнитной оси

обмотки магнита. Усредненное значение измерений принимается за положение магнитного центра [1].

После нахождения положения магнитного центра определяются угловые положения магнитной оси. Измерения проводятся на четвертой гармонике, трансляторы перемещаются разнонаправленно. Полученные значения амплитуды колебаний струны приведены на рис. 3. Измерения также проводятся при положительной и отрицательной полярностях питания обмотки магнита, среднее значение принято за положение магнитной оси. Данные измерения проводятся в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На данный момент измерено 46 магнитов арок. Все измерения проведены при температуре окружающей среды. Результаты измерений приведены на рис. 4–6.

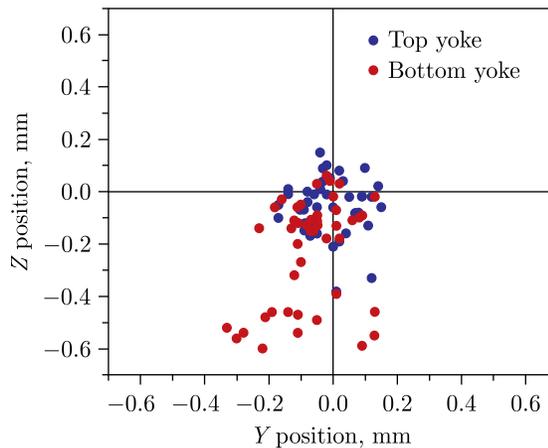


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Положения магнитных центров квадрупольных магнитов коллайдера NICA

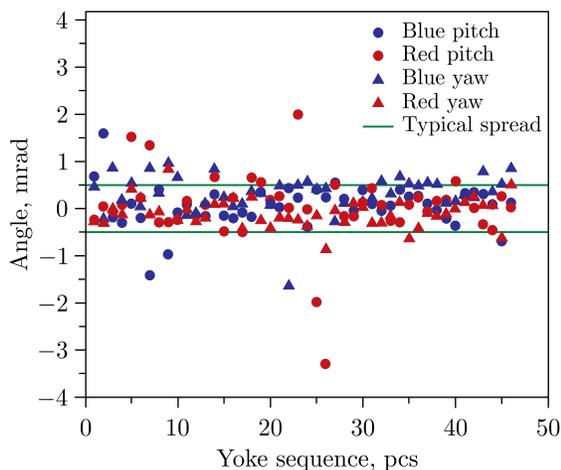


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Угловые положения магнитной оси

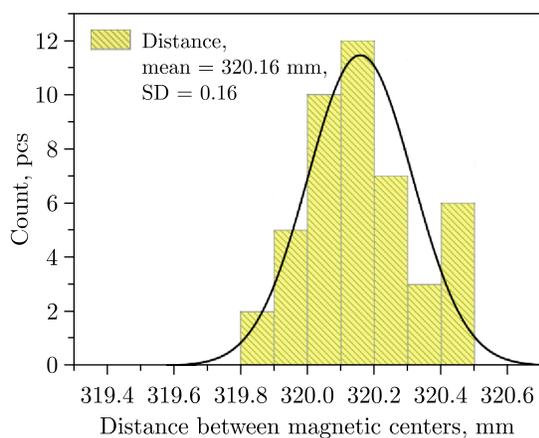


Рис. 6. Расстояние между магнитными осями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система измерений положения магнитной оси на основе вибрационной струнной методики разработана, собрана и успешно введена в эксплуатацию. Измерения положения магнитной оси успешно проведены для 46 квадрупольных магнитов арок коллайдера NICA. Разработанная система отвечает требованиям к точности измерения отклонения положения магнитной оси от геометрической для сверхпроводящих квадрупольных магнитов коллайдера NICA. Система является универсальной и может применяться для проведения измерений магнитной оси других типов многополюсных магнитов.

Выявлено отклонение положения магнитного центра по вертикальной координате (Z) в квадрупольных магнитах нижнего (красного) яра. Величина отклонения в 0,22 мм входит в суммарный допуск на положение геометрической оси в систе-

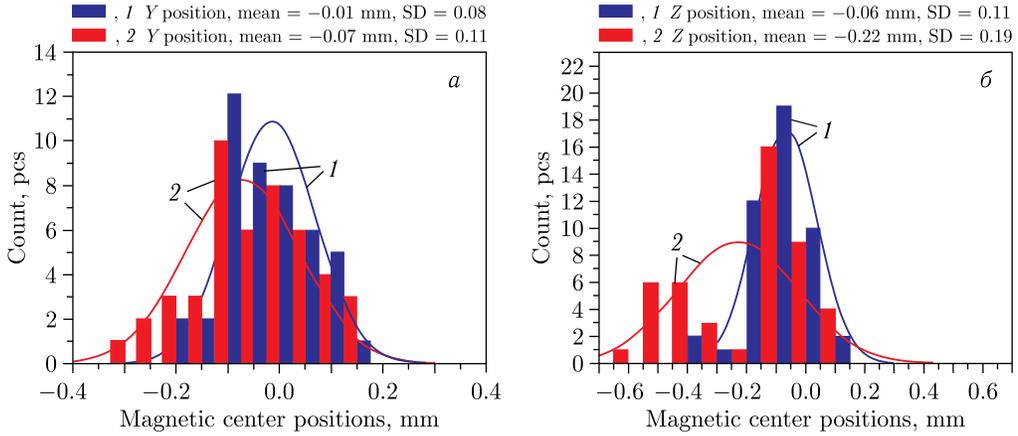


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Нормальное распределение положений центров магнитной оси по координате Y (а) и координате Z (б). Результаты представлены для верхней (синий, 1) и нижней (красный, 2) апертур

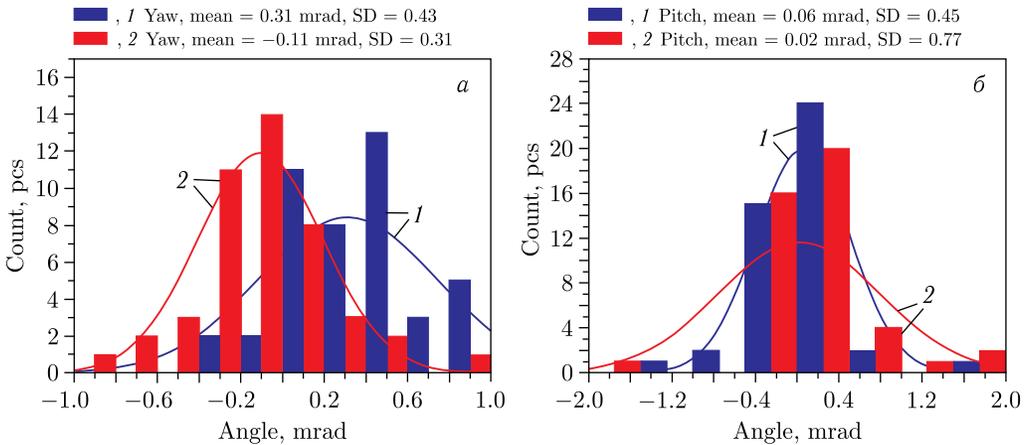


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Нормальное распределение величин углов магнитной оси в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях. Результаты представлены для верхней (синий, 1) и нижней (красный, 2) апертур

ме координат магнита и отклонение магнитной оси от геометрической и связана с конструктивными особенностями магнитов (рис. 7, 8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Parfilyo T. et al.* Vibrating Wire System for Fiducialization of NICA Booster Superconducting Quadrupole Magnets // Proc. of the 27th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'21), Alushta, Russia, Sept. 26–Oct. 2, 2021. Geneva: JACoW Publ., 2021. P.12–16; <http://jacow.org/rupac2021/papers/wepsc17.pdf>.

2. *Khodzhbagiyan H. et al.* Superconducting Magnets for the NICA Accelerator Complex in Dubna // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 3. P. 1795–1798.
3. *Wolf Z.* A Vibrating Wire System for Quadrupole Fiducialization. SLAC TN 10 087. 2010.
4. *Temnykh A.* The Magnetic Center Finding Using Vibrating Wire Technique // 11th Intern. Magn. Measurement Workshop, Upton, NY, USA, Sept. 21–24, 1999. C99-09-21.4.

Получено 18 ноября 2022 г.