

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ СТРУННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*И. Ю. Николайчук **

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Магнитометрические системы на основе струнных методик обладают универсальностью и потенциально высокой точностью измерений. Обеспечение необходимой точности измерений требует проведения на этапе ввода установки в эксплуатацию калибровки измерительного оборудования и минимизации факторов, вносящих систематические ошибки. Приводится описание опыта ввода в эксплуатацию магнитометрической установки с применением струны для магнитов ускорительно-коллайдерного комплекса NICA (ОИЯИ, Дубна).

Magnetic measurement systems based on wire's technique are universal and potentially high-precision. To achieve necessary measurements tolerance requires calibration of measurement equipment at commissioning stage and decreasing of systematic errors. This paper describes an experience of based-on-wire magnetic measurement system commissioning for the magnets of the accelerator complex NICA (JINR, Dubna).

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

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных систем ускорителей заряженных частиц является магнитная система. В кольцевых ускорителях синхротронного типа частицы совершают миллионы оборотов. Наличие ошибок изготовления и позиционирования магнитов приводит к ухудшению количественных и качественных характеристик пучка. Для достижения проектных параметров установки необходимо соблюдение жестких требований к качеству магнитного поля. Проверка соответствия параметров магнитного поля расчетным значениям проводится на этапе производства магнита посредством магнитных измерений. Повышение требований к качеству поля влечет за собой необходимость применения прецизионных магнитометрических методик и систем.

Наиболее распространенными устройствами измерения магнитного поля элементов ускорителей являются гармонические катушки, датчик

* E-mail: nikolajchuk@jinr.ru

Холла и струна. Струнные методики измерений имеют ряд преимуществ, таких как универсальность магнитометрической системы и возможность измерять магниты с малыми апертурами. Датчиком измерения поля служит токопроводящая струна. В зависимости от способа взаимодействия струны с магнитным полем выделяют следующие методы: вибрирующей струны, натянутой струны и пульсирующей струны.

Струна представляет собой проволоку диаметром 0,1–0,2 мм из немагнитного токопроводящего материала (бериллиевой бронзы, титана и др.), критерием при выборе которого является его прочность, что позволяет увеличить силу натяжения струны. Это снижает чувствительность к внешним вибрационным помехам. Кроме того, увеличение натяжения струны уменьшает величину ее провисания под собственным весом.

Определение пространственного положения струны представляет сложную задачу, поскольку при касании струны измерительным оборудованием ее положение изменяется. Еще одной проблемой является малое пятно контакта струны с опорой, что не позволяет с достаточной точностью определить точку опоры струны. При установке реперных точек для измерения положения струны на расстоянии от узла поддержки данные проблемы решаются. Однако возникает необходимость точного определения расстояний (офсетов) от точки опоры струны до реперных точек.

Основными источниками ошибок измерений являются внешние магнитные поля, а также электромагнитные и вибрационные помехи. Снижение их влияния на результаты измерений — одна из основных задач на этапах разработки и ввода в эксплуатацию магнитометрических систем с использованием струны.

СТРУННЫЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Методика вибрирующей струны. Данная техника измерений наиболее широко применяется для определения положения магнитной оси квадрупольных магнитов. Метод основан на регистрации механических колебаний струны, находящейся в постоянном поле измеряемого магнита при пропускании через нее переменного тока. Последовательно варьируя пространственное положение струны в апертуре магнита, измеряем амплитуду ее колебаний, минимальное значение которой является критерием приближения струны к искомой магнитной оси.

Частота переменного тока в струне выбирается кратной частоте собственных колебаний струны. Эффект резонанса значительно повышает чувствительность метода. Измерение механических колебаний струны производится двумя ортогонально расположенными оптическими датчиками.

Методика вибрирующей струны также используется при измерениях продольного распределения магнитного поля. Для этого измеряется набор амплитудно-частотных зависимостей колебаний струны вблизи

частот резонансов собственных колебаний. Затем аппроксимацией каждой зависимости полиномиальным выражением определяются коэффициенты, зависящие от магнитного поля. Точность измерений зависит от количества измеренных гармоник и точности приближения с использованием выбранного метода аппроксимации.

Методика натянутой струны. При использовании данного способа измеряемым параметром является электродвижущая сила, возникающая в струне при ее движении в постоянном магнитном поле. Изменяя траекторию движения струны, можно определять интегральные параметры магнитного поля, такие как величину индукции поля, градиент, гармоники, положение магнитной оси, угол поворота магнитного поля и др. При измерениях малых полей данный метод является особенно чувствительным к внешним магнитным полям.

Методика пульсирующей струны. Техника пульсирующей струны наиболее часто используется при магнитных измерениях полей вигглеров и ондуляторов. Измеряемой величиной являются механические колебания струны, возникающие при пропускании по струне импульса высокого напряжения. Под воздействием силы Лоренца в струне образуется область возмущения, распространяющаяся к концам струны. Измеряя форму этой волны оптическим датчиком, можно получить информацию о первом и втором интегралах магнитного поля [1].

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТОВ КОМПЛЕКСА NICA

На основе метода вибрирующей струны были созданы магнитометрические системы для измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов бустера [2] и коллайдера NICA [3]. Помимо этого введена в эксплуатацию магнитометрическая система, реализующая метод натянутой струны.

Магнитометрическая система представляет собой две гранитные стойки, установленные на юстировочные подставки. На стойках располагаются системы перемещения и натяжения струны и система регистрации колебаний (рис. 1) [4].

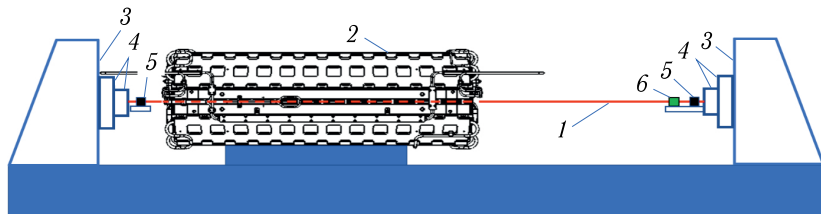


Рис. 1. Схема измерительной системы: 1 — струна; 2 — квадрупольный магнит; 3 — стойки поддержки основных узлов системы; 4 — система перемещения струны; 5 — система натяжения струны; 6 — система регистрации колебаний

Конструкция магнитометрической системы разработана таким образом, чтобы минимизировать влияние внешних помех в процессе измерений. Массивные гранитные стойки снижают чувствительность к внешним вибрационным помехам. Автоматическая система натяжения струны обеспечивает долговременную стабильность резонансной частоты собственных колебаний струны в пределах 0,02 %. Постоянство резонансной частоты позволяет сохранять резонансные условия и, следовательно, чувствительность во всем цикле измерений. Серводвигатели системы перемещения струны с точностью позиционирования 0,1 мкм и максимальной скоростью перемещения 35 мм/с обеспечивают необходимую траекторию движения струны.

Узел поддержки струны описываемой измерительной системы представляет собой две жестко фиксированные и касающиеся друг друга рубиновые сферы диаметром 1 мм (рис. 2). В паз между ними вкладывается струна. Такая конструкция обеспечивает неизменное положение струны при перемещениях и ее электрическую изоляцию.

Детектирование механических колебаний струны производится оптическим прерывателем (оптопарой) с воздушным промежутком (рис. 3, а). Оптопара состоит из инфракрасного светодиода и фотоприемника. Колеблущаяся струна перекрывает световой поток от светодиода, что вызывает колебания напряжения на выходе оптопары. Путем измерения амплитуды колебаний напряжения определяется амплитуда колебаний струны. Однако оптопара имеет линейную зависимость выходного напряжения от величины перекрытия светового потока лишь в малых областях выходной характеристики (рис. 3, б). Назовем эти участки рабочей областью оптопары. Рабочая область определяется как среднее между максимальным и минимальным значениями напряжения на выходе оптопары с пределами $\pm 0,1$ В. Максимальная и минимальная величины напряжения на выходе оптопары соответствуют минимальному и максимальному перекрытию светового потока струной соответственно. Поддержание рабочей области оптопар необходимо в течение всего цикла измерений. Для этого предусмотрена система перемещений оптопар и разработан алгоритм,

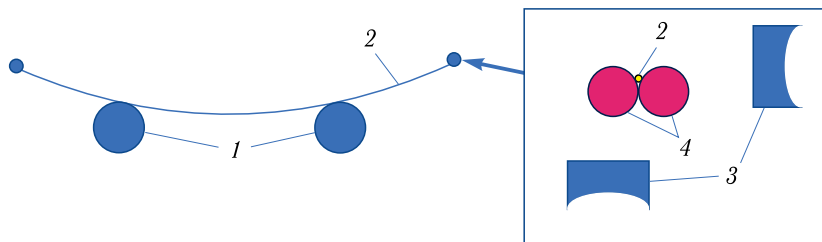


Рис. 2. Схема калибровки офсетов: 1 — калибровочные сферы; 2 — струна; 3 — реперные точки; 4 — рубиновые сферы узла поддержки струны

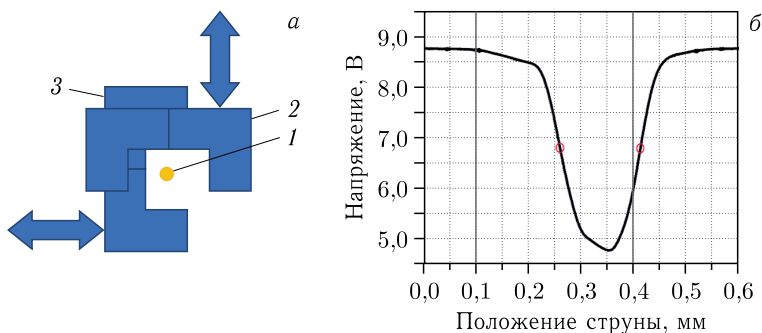


Рис. 3 (цветной в электронной версии). а) Система детектирования колебаний струны: 1 — струна; 2 — оптопара для регистрации вертикальных колебаний; 3 — оптопара для регистрации горизонтальных колебаний. б) Зависимость напряжения на выходе оптопары от положения струны, красным выделены рабочие области оптопары

«следающий» за текущим постоянным напряжением с оптопары и (при необходимости) перемещающий ее для сохранения рабочей области.

Юстировка гранитных стоек производится с точностью $\pm 0,03$ мм. Главной задачей юстировки является обеспечение параллельности перемещения струны в горизонтальном и вертикальном направлениях. Это значительно упрощает последующую привязку траекторий движения струны к системе координат магнита.

КАЛИБРОВКА И ПОДАВЛЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК

Калибровка офсетов. При вводе в эксплуатацию струнной магнитометрической системы в первую очередь производится калибровка величины офсетов. Струна в горизонтальной плоскости представляет собой прямую. Из этого следует, что для определения ее пространственного положения достаточно двух точек. В вертикальной плоскости струна провисает под действием гравитации. Форма провисающей струны описывается уравнением цепной линии:

$$y(x) = a \cosh\left(\frac{x + c_1}{a}\right) + c_2,$$

где $a = T/(qg)$; c_1 и c_2 — свободные параметры; T — проекция силы натяжения на продольную ось; q — вес единицы длины струны; g — ускорение свободного падения. Коэффициент a определяется расчетным путем. Для нахождения свободных параметров уравнения цепной линии необходимо решить систему из двух уравнений, составляемых по координатам крайних точек струны.

Задача определения офсетов подразумевает измерение реального положения струны в пространстве и положения реперных точек. Для этого

устанавливаются две калибровочные сферы (см. рис. 2, 1) из токопроводящего материала, диаметр которых известен с высокой точностью, и измеряется их пространственное положение. После этого струна натягивается в рабочем положении и перемещается до одновременного касания двух сфер. Касание струной сферы фиксируется по замыканию токовых цепей струна–сфера. В этом положении измеряются координаты реперных точек. Затем струна перемещается в следующую точку, и процесс повторяется. Вышеизложенный итерационный процесс повторяется до тех пор, пока не будет «обкатана» как минимум половина окружности сфер. После проведения необходимых геометрических построений определяются искомые офсеты.

Компенсация вклада внешних магнитных полей при измерении магнитной оси. Проведение прецизионных магнитных измерений требует тщательного учета и минимизации вклада внешних магнитных полей. Эта задача особенно актуальна при измерении магнитов с малыми полями. Измерения положения магнитной оси сверхпроводящих квадрупольных магнитов коллайдера NICA производились при температуре окружающей среды. Величина магнитного поля составляла 3 % от номинальной. В процессе определения положения магнитной оси методом вибрирующей струны снижение влияния внешних магнитных полей производится путем усреднения результатов измерений в положительной и отрицательной полярностях питания обмотки магнита. Для проверки эффективности данного способа измерений в систему было введено дополнительное постоянное магнитное поле вне апертуры измеряемого магнита. Сравнение результатов, полученных при измерениях до и после введения дополнительного внешнего поля, приведено на рис. 4.

Ток в обмотке магнита линейно связан с величиной поля. Таким образом, можно оперировать зависимостями результатов измерений от тока питания магнита. Данные зависимости для каждой полярности питания магнита представляют собой гиперболы, горизонтальная асимптота которых определяет положение магнитной оси. Как видно из рис. 4, средние значения между измерениями в двух полярностях для разной величины поля в магните сходятся с точностью лучше $\pm 0,02$ мм. Из этого следует, что измерения можно проводить в двух полярностях питания магнита с фиксированной величиной поля. Это позволяет значительно сократить время измерений без существенной потери точности.

Учет внешних магнитных полей в методе натянутой струны. В измерениях натянутой струной она движется как целое в суммарном магнитном поле, создаваемом измеряемым магнитом и внешними источниками полей. Для повышения точности измерений необходимо минимизировать вклад внешних полей. Это можно реализовать путем устранения источников поля (если это возможно) или вычитанием вклада внешних полей при последующей обработке результатов измерений.

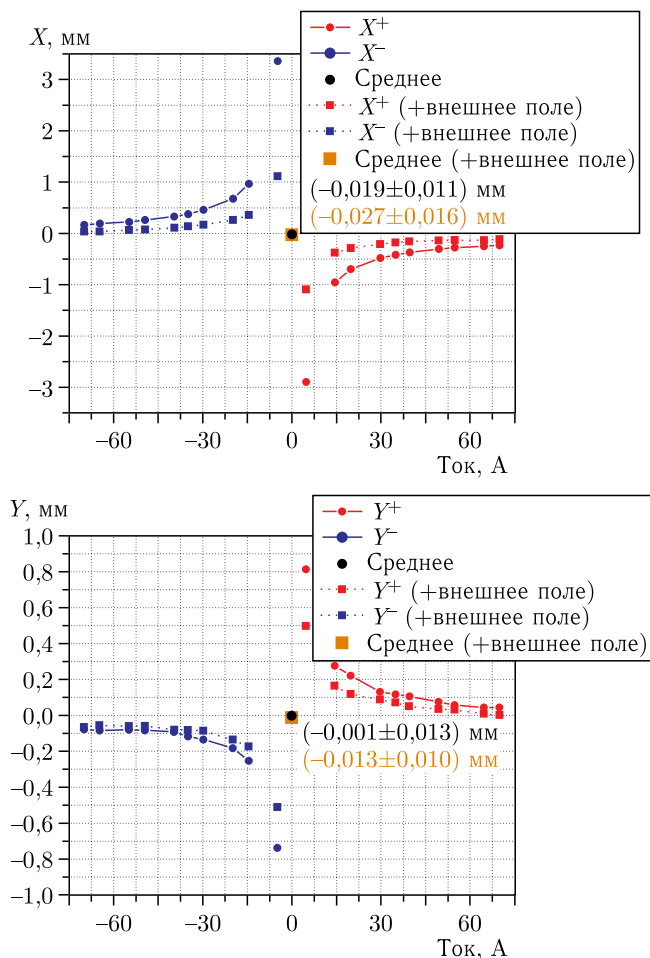


Рис. 4. Зависимости результатов измерения положения магнитной оси от тока в обмотке магнита в двух полярностях измерений

Учет вклада магнитного поля Земли [5] может производиться как расчетным, так и техническим путем. Значения поля мониторяются круглосуточно, есть возможность получать их в режиме реального времени. Техническим решением проблемы вклада магнитного поля Земли может служить создание помещения с экранированием внешних полей. Выбор метода зависит от требуемой точности измерений и величины измеряемых полей. В большинстве задач при измерениях магнитных полей элементов ускорителей создание экранированных комнат является нецелесообразным. Детальное изучение и последующий учет влияния

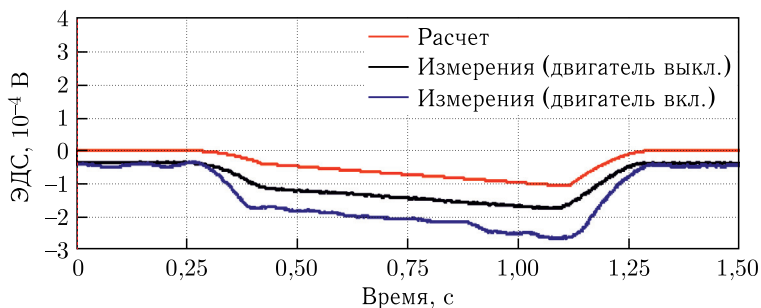


Рис. 5. Влияние магнитного поля шагового двигателя системы натяжения струны на результаты измерений

внешних магнитных полей на результаты измерений являются достаточными способами получения требуемой точности измерений.

Внешние магнитные поля могут создаваться периферийными устройствами, в основном электрическими двигателями. Первые измерения методом натянутой струны на описываемой магнитометрической системе показывали недостаточную сходимость с расчетами. Причиной этого являлось магнитное поле величиной около 4 Гс, создаваемое шаговым двигателем системы натяжения струны (рис. 5). Наиболее простым решением данной проблемы является выключение двигателя на время измерений, однако необходимо убедиться, что при этом сила натяжения струны не будет существенно изменяться.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы измерений на основе струнных методик являются прецизионным измерительным инструментом магнитных полей элементов ускорителей. Для достижения высокой точности измерений необходимо производить ряд калибровочных работ на этапе ввода стенда в эксплуатацию. Технология определения расстояний между струной и реперными точками позволяет располагать реперы в любом положении, исходя из требований их доступности для последующих измерений положения струны. Система детектирования механических колебаний струны и алгоритм поиска рабочей области оптопар служат для автоматизации измерений положения магнитной оси. Метод измерения магнитной оси в двух полярностях позволяет проводить измерения при малых величинах тока питания магнита с фиксированным значением амплитуды тока. Учет влияния внешних магнитных полей индивидуален для каждой магнитометрической системы. Итерационный процесс поиска источников поля и устранение их негативного вклада позволяют достичь требуемой точности проводимых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толмачев С. В. Экспериментальные исследования по созданию специальных ондуляторов для лазеров на свободных электронах и лазерных ускорителей. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2004.
2. Parfyo 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.
3. Николайчук И. Ю. и др. Первые измерения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 6(251). С. 1463–1469.
4. Николайчук И. Ю. и др. Статус измерений положения магнитной оси квадрупольных магнитов коллайдера NICA // Сиб. физ. журн. 2024. Т. 19, № 1. С. 68–79.
5. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1978.