



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»**

Препринт 2023–12

**В.Н. Алферов¹, А.Н. Васильев^{1,2}, Д.А. Васильев¹,
В.А. Кормилицын¹, А.В. Лутчев^{1,*}, А.П. Мещанин¹,
Н.Г. Минаев¹, В.В. Мочалов^{1,2}, В.Л. Рыков², А.Д. Рябов¹,
Т.Д. Рябова¹, П.А. Семенов^{1,2}, В.А. Соловьев¹,
В.Н. Федорченко¹, А.Н. Холкин¹**

**Система измерения поля в широкоапертурных
магнитах физических установок на ускорительном
комплексе У-70**

Направлено в ПТЭ

¹ НИЦ «Курчатовский Институт» - ИФВЭ

² Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ

* e-mail: lutchev@ihep.ru

Аннотация

Алфёров В.Н. и др. Система измерения поля в широкоапертурных магнитах физических установок на ускорительном комплексе У-70: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ 2023 - 12. - Протвино, 2023. – 22 с., 10 рис., библиогр.: 7.

Приведено описание системы магнитных измерений в больших объемах на основе датчиков Холла, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, вместе с примером её практического использования для измерения топографии поля спектрометрического магнита [1] эксперимента СПАСЧАРМ [2] на ускорительном комплексе У-70. В этих измерениях особое внимание было уделено калибровкам, контролю за стабильностью параметров, точности позиционирования датчиков в апертуре магнита и их ориентации. Представлено также дальнейшее развитие системы и изучение её возможностей для улучшения точности и сокращения времени измерений и, в целом, для повышения гибкости в применениях.

Abstract

Alferov V.N. et al. The system for measuring magnetic field in wide-aperture magnets of physics experiments at the U-70 accelerator complex: NRC «Kurchatov Institute» - IHEP Preprint 2023–12. – Protvino, 2023. – p. 22, fig. 10, refs.: 7.

The system for magnetic measurements in large volumes, developed and built at the National Research Center «Kurchatov Institute» - IHEP, based on Hall sensors, is described, along with its practical use for measuring the field topography in the spectrometer magnet [1] of the SPASCHARM experiment [2] at the U-70 accelerator complex. In these measurements, the special attention has been paid to calibrations and monitoring the stability of parameter, as well as to precise positioning and orientation of the sensors in the magnet. The further development of the system is also presented with the aim of improving accuracy, reducing the measurement time and, generally, of adding more flexibility to its usage.

Введение

Широкоапертурные спектрометрические магниты являются неотъемлемой частью физических установок с большим угловым аксептансом на ускорителях. Магнитное поле в них, отклоняющее вторичные заряженные частицы, обычно занимает большой объём до нескольких кубических метров и, как правило, является существенно неоднородным. Рис. 1 даёт представление о том, как выглядит типичный такой магнит [1].

Погрешности в знании отклоняющей силы магнита в его рабочей апертуре напрямую отражаются на важнейшей физической характеристике спектрометра - его импульсном разрешении, т.е. на ошибках измерения импульсов заряженных вторичных частиц. Поэтому точность знания топографии поля должна быть, во всяком случае, не хуже целевой точности импульсного разрешения. В эксперименте СПАСЧАРМ, например, требуется, чтобы импульсное разрешение для частиц с импульсами до 10 ГэВ/с было не хуже, чем $\sim \pm 0.4\%$ [2]. Следовательно, с некоторым запасом на другие источники ошибок, отклоняющая сила спектрометрического магнита СПАСЧАРМ вдоль любой траектории в пределах аксептанса должна быть известна с погрешностью не более $\sim \pm (0.2-0.3)\%$.

Столь высокая точность в довольно сложной геометрии магнитов обычно обеспечивается сочетанием численных расчётов и последующим сопоставлением их с магнитными измерениями в рабочей апертуре или, как минимум, в значительной её части. Как правило, в расчётах присутствуют неопределённости, связанные с плохим знанием магнитных характеристик использованных материалов, а также с абстрагированием от мелких деталей реальной конструкции. При необходимости, результаты магнитных измерений используются для корректировки расчётной картины.

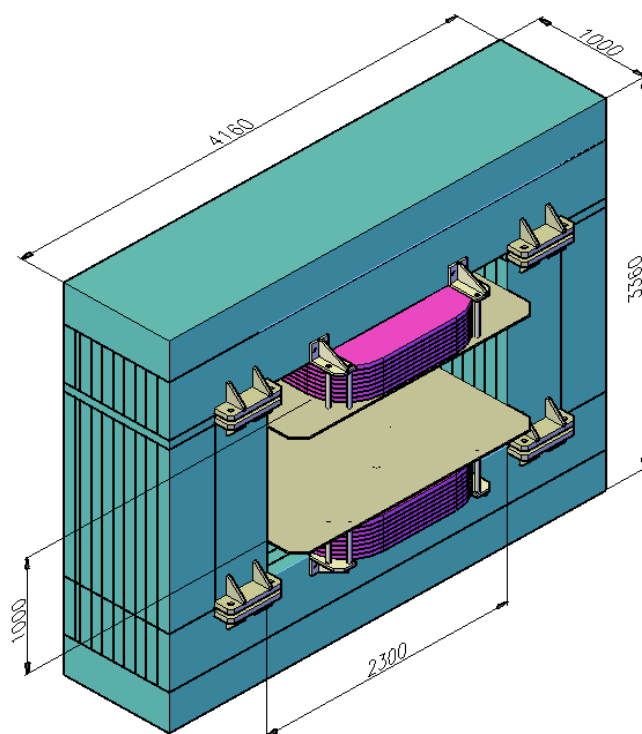


Рис. 1. Широкоапертурный спектрометрический магнит эксперимента СПАСЧАРМ. Стальные экраны для защиты трековых детекторов от рассеянного магнитного поля не показаны.

В данной работе описана система магнитных измерений (СМИ) на базе датчиков Холла, разработанная и созданная в НИЦ «Курчатовский Институт» - ИФВЭ. СМИ предназначена для восстановления топографии поля в больших объёмах. Приведены результаты её использования в измерениях на спектрометрическом магните [1] эксперимента СПАСЧАРМ [2]. Предыдущая версия этой СМИ использовалась для получения карты поля большого магнита установки СВД-2 [3,4]. По оценкам авторов, достигнутая тогда точность измерений поля составила $\sim\pm(1-5)\%$, что в абсолютных единицах равно $\sim\pm(5-8)$ мТл.

В последующем, в рамках развития настоящей СМИ в неё были внесены ряд усовершенствований. В частности, были добавлены и испытаны а) прецизионное автоматическое перемещение вертикальной кассеты с датчиками Холла вдоль второй горизонтальной оси; б) возможность проведения измерений в процессе непрерывного движения датчиков.

В измерениях топографии магнитного поля спектрометрического магнита СПАСЧАРМ в большей части рабочего объёма вдали от острых рёбер и углов стальных полюсов была достигнута точность измерений $\sim \pm 1$ мТл, что составляет $\sim 0.2\%$ от индукции ~ 0.54 Тл в центре магнита. Вблизи ребер и углов, где очень высока чувствительность к позиционированию датчиков, погрешности несколько больше и достигают $\sim \pm 2$ мТл $\approx \pm 0.4\%$. Важнейшим условием для получения таких результатов был, прежде всего, постоянный контроль за стабильностью всех составляющих системы от вариаций поля магнита и чувствительности датчиков Холла до повторяемости их позиционирования в рабочем объёме. Кроме того, при обработке данных были извлечены и приняты во внимание коррекции на индивидуальную ориентацию каждого датчика, а также учтены нелинейности каналов измерений, полученные в результате их калибровки в магните с хорошей однородностью поля. Важную часть работы составила прецизионная геометрическая привязка расчётной и измеренной карт поля по комбинации двух подходов: по наилучшему наложению карт друг на друга и по результатам прямых геодезических измерений.

1. Описание системы магнитных измерений

1.1. Датчики

Измерение всех трёх компонент индукции магнитного поля выполнялось сборками полупроводниковых арсенид-галлиевых датчиков Холла производства ООО «Вега – Флекс». Каждая сборка содержит три датчика типа ПХЭ602817В со следующими характеристиками:

- магнитная чувствительность при $B=0.1$ Тл: $60 \div 75$ мкВ/мТл;
- ток питания: 100 мА;
- входное сопротивление: 4.5 Ом;
- температурный коэффициент чувствительности: $-0.004\% / ^\circ\text{C}$.

Тройка датчиков для трёх координат монтируется в центре квадратного контейнера из капролона размером 40×40 мм². Контейнеры с датчиками устанавливаются в жёлоб алюминиевой кассеты.

1.2. Электроника каналов измерения сигналов с датчиков

Электроника измерения сигналов с датчиков Холла состоит из трёх 24-канальных блоков ДХ24, подключенных к промышленному компьютеру NISE3145 по интерфейсам USB. Блок ДХ24 имеет:

- 24 входных канала с предварительным усилением на микросхемах AD 620 и трех АЦП типа ADS1278 с одновременной выборкой каналов на входе. Частота оцифровки сигналов: 12 кГц. Диапазон измеряемых напряжений составляет ± 125 мВ. Коэффициент усиления канала равен 20.
- Встроенный стабильный источник тока 100 мА для питания датчиков Холла.
- АЦП типа LTC 2400 для контроля тока.
- Два канала измерения температуры: на кассете с датчиками Холла и в блоке электроники. Используются полупроводниковые интегральные микросхемы - термодатчики типа AD592, обеспечивающие точность измерений $\sim \pm 0.5^\circ\text{C}$.
- В системе также присутствует канал для считывания показаний монитора тока питания магнита.

Во время работы системы оцифровка сигналов на выходах усилителей осуществляется с частотой $f_D = 12$ кГц. Результаты последовательных оцифровок аппаратным образом усредняются по интервалу между считываниями этих средних значений. Частота считываний f_R , кратно меньшая f_D , задаётся программным образом. Усреднение оцифрованных сигналов по временным интервалам $1/f_R$ ведёт к пропорциональной $\sqrt{f_R/f_D}$ зависимости стохастических флуктуаций (шумов) считываемых данных. В представленных ниже измерениях на спектрометрическом магните СПАСЧАРМ при частоте $f_R = 500$ Гц среднеквадратичные значения шумов измерительных каналов датчиков Холла, приведённые к входам усилителей, варьировались в диапазоне $\sim (2-4)$ мкВ, что в единицах индукции магнитного поля соответствует $\sim (0.03-0.07)$ мТл. Оцененные по тем же измерениям относительные среднеквадратичные шумы источников токов питания датчиков на частоте считывания $f_R = 500$ Гц лежали в интервале $\sim (0.35-2.6) \cdot 10^{-4}$, что при токе 100 мА соответствует $\sim (3.5-26)$ мкА.

Считывание и запись мониторов тока и температуры осуществляется синхронно и вместе с измерениями поля датчиками Холла. Более подробно электроника каналов измерения описана в публикациях [3,4].

1.3. Механизм крепления и перемещения контейнеров с датчиками Холла

Система крепления датчиков Холла и их перемещения в рабочей области подробно описаны в публикациях [3,4], хотя механика этой системы всегда создаётся под геометрию конкретного магнита.

В измерениях на магните СПАСЧАРМ 22 контейнера с датчиками были установлены в жёлоб прямоугольной алюминиевой кассеты с поперечными размерами $50 \times 60 \text{ мм}^2$ и длиной 88 см. Контейнеры в кассете устанавливаются вплотную друг к другу. Таким образом, дистанция между соседними сборками датчиков вдоль кассеты составляет 40 мм. Специальные ЯМР измерения в рабочем поле магнита СПАСЧАРМ показали, что относительные искажения поля материалом кассеты и всем содержимым контейнеров не превышают $\sim 0.01\%$, т.е. пренебрежимо малы на уровне целевой точности измерений $\sim \pm(0.2-0.3)\%$.



Рис. 2. Слева: схематический вид тележки с кассетой и датчиками Холла на рельсах. Справа: фото системы магнитных измерений внутри спектрометрического магнита СПАСЧАРМ. В принятой и показанной здесь правой Декартовой системе координат ось Z направлена вниз по пучку, ось Y - вертикально вверх, а ось X - горизонтально поперёк пучка. За начало координат обычно выбирается центр магнита.

Механика перемещения датчиков Холла в апертуре магнита СПАСЧАРМ схематически показана на Рис. 2. Вся система смонтирована на тележке, которая способна перемещаться по двум рельсам вдоль горизонтальной продольной оси Z . Она приводится в движение двумя шаговыми двигателями, расположенными вне магнитного поля, с помощью тросиков из нержавеющей стали, диаметром 2 мм, перекинутых на дальнем от двигателя конце через барабан. Таким способом обеспечивается синхронное перемещение краев широкой тележки. Шаговые двигатели FL60STH86 с шагом по окружности 1 мм для перемещения тележки управ-

ляются одним контроллером. Полный ход тележки вдоль оси Z составляет 2000 мм. Для контроля крайних положений используются концевые выключатели.

Кассета с датчиками установлена на подвижной каретке, которая перемещается горизонтально в поперечной плоскости вдоль оси X с полным ходом 1280 мм. В измерениях на магнитах СВД [3,4] и СПАСЧАРМ перемещение и позиционирование каретки вдоль оси X осуществлялось вручную.

1.4. Калибровка датчиков Холла

Калибровка датчиков Холла была проведена на ускорительном дипольном магните УНК [5], длиной 6 м и с размерами апертуры 190×64 мм². Кассета с датчиками Холла располагалась в апертуре горизонтально. Датчики для измерения X и Z компонент индукции калибровались в штатной сборке кассеты с контейнерами, укладывая кассету на тот или иной бок, чтобы соответствующие датчики были ориентированы на измерение вертикального поля магнита. Для калибровки же Y -датчиков, в штатной сборке ориентированных вдоль кассеты, контейнеры с датчиками Холла вынимались и вновь вставлялись в кассету, но после поворота их на 90° . На концах кассеты в фиксированных положениях были размещены два ЯМР-датчика [6], на показания которых нормировались калибровки. Предварительно теми же ЯМР-датчиками было измерено распределение поля в зоне расположения калибруемых датчиков Холла. Неоднородность в поперечном сечении оказалась пренебрежимо маленькой на уровне $\leq 0.01\%$. В продольном же направлении относительные вариации поля на длине кассеты с датчиками Холла достигали $\sim 0.35\%$. Они были учтены в анализе данных.

Измерения в магните были проведены на 22-х уровнях поля в диапазоне индукций от -0.8 до +0.8 Тл. К ним следует добавить ещё измерение пьедесталов в нулевом поле вне магнита. На Рис. 3 слева на примере одного из Y -датчиков показана зависимость истинной - по ЯМР-зондам - магнитной индукции B в точке нахождения этого датчика от значения b_Y , полученного в измерениях самим датчиком Холла в предположении его линейности с коэффициентом чувствительности из заводского паспорта. Визуально, зависимость $B(b_Y)$ очень близка к линейной. Однако фиты этих характеристик линейными функциями для всех 22-х Y -датчиков дают картину невязок, показанную в средней рамке, на которой отчётливо видно систематическое поведение отклонений с изменением величины поля. Для большинства датчиков величина этих отклонений укладывается в $\sim \pm 2$ мТл. Но для нескольких датчиков¹ откло-

¹ Показанных на рисунке разными цветами.

нения в 2-3 раза больше. В правой рамке Рис. 3 приведены подобные же невязки, но после фитирования тех же зависимостей более сложной полиномиальной функцией:

$$B(b_Y) = P + K \cdot b_Y \cdot (1 + C \cdot b_Y + D \cdot b_Y^2) \quad (1)$$

Во всех фитах константы P были зафиксированы и равны значениям пьедесталов, измеренным в нулевом поле вне магнита. Видно, что все невязки упали до вполне приемлемого уровня $\sim \pm 0.4 \text{ мТл} \approx \pm 0.07\%$ от индукции в центре магнита СПАСЧАРМ, равной $\sim 0.54 \text{ Тл}$. Калибровочные поправки, полученные из фитов функцией (1) для каждого из 66 датчиков, в дальнейшем использовались в анализе магнитных измерений на спектрометрическом магните СПАСЧАРМ. Стоит отметить, что все найденные константы K оказались несколько меньше единицы, в основном, примерно на (0.5-1.5)%, хотя есть несколько датчиков, выпавших в ту же сторону на (2-3)%.

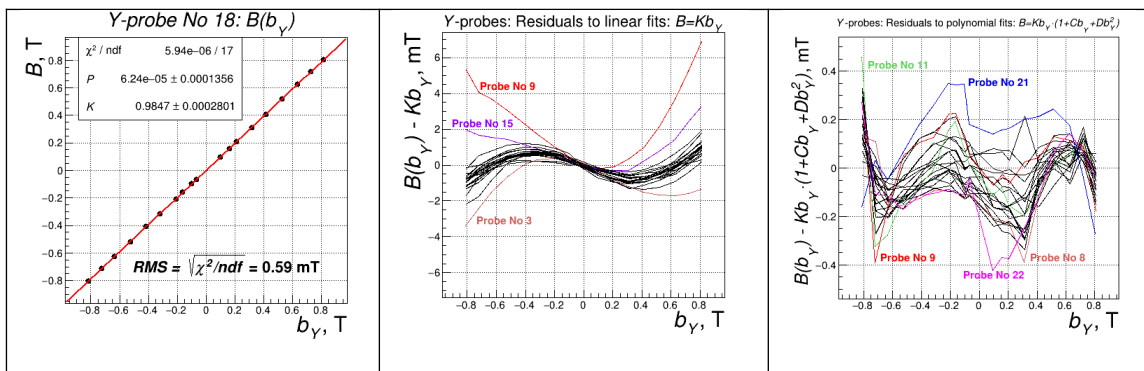


Рис. 3. Слева: измеренная зависимость $B(b_Y)$ для Y -датчика №18 . В середине: невязки для линейных фитов измеренных $B(b_Y)$ зависимостей для всех Y -датчиков. Справа: невязки для фитов тех же $B(b_Y)$ зависимостей функцией (1). Подробности в тексте.

Для измерения топографии магнитного поля с точностью $\pm(0.2-0.3)\%$ необходимо измерение ориентации каждого датчика Холла в принятой системе координат с ошибкой не более $\pm(2-3)$ мрад $\approx \pm(0.1-0.15)^\circ$, потому что представляется вряд ли возможным на практике выдержать столь высокий допуск на однородность ориентации миниатюрных датчиков при наклеивании их на поверхности. В калибровочных измерениях источником информации об ориентации датчиков являются отклики этих датчиков на вертикальное поле магнита, когда они «смотрят» горизонтально. Чтобы исключить ошибки углового позиционирования кассеты в целом по отношению к направлению поля, измерения были сделаны во всех 8-ми возможных её положениях в апертуре магнита. В дальнейшем при обработке рабочих измерений на маг-

ните СПАСЧАРМ выяснилось, однако, что точность этих измерений недостаточно высока. Причиной тому явились, по-видимому, погрешности углового позиционирования кассеты в калибровочном магните, а также то обстоятельство, что конфигурация кассеты с контейнерами при калибровке Y -датчиков отличалась от штатной в рабочих измерениях на магните СПАСЧАРМ. Поэтому окончательную картину по ориентации датчиков Холла пришлось реконструировать уже в процессе анализа рабочих данных (см. раздел 2.2).

2. Измерения топографии поля магнита СПАСЧАРМ

Преимущественно вертикальное поле спектрометрического магнита СПАСЧАРМ [1, 2] (Рис. 1) формируется двумя стальными полюсами, размерами $X_p \times Z_p = 0.8 \times 1 \text{ м}^2$, и с зазором между ними $Y_A = 1 \text{ м}$. Магнитный поток замыкается через две симметричные ветви стального ярма, сечением $0.85 \times 1 \text{ м}^2$ каждая. Полный горизонтальный размер апертуры между щеками ярма $X_A = 2.3 \text{ м}$. Обмотка магнита состоит из двух катушек, охватывающих полюса и включённых параллельно. На некотором расстоянии вверх по пучку от центра магнита при $Z \approx 0.8 \text{ м}$ размещён стальной «передний» экран, толщиной 100 мм с окном размерами $X_{S1} \times Y_{S1} = 2.3 \times 0.6 \text{ м}^2$ для защиты трековых детекторов от рассеянного магнитного поля. Для тех же целей ниже по пучку от центра магнита при $Z \approx +1.1 \text{ м}$ установлен сдвоенный «задний» экран из двух листов железа, толщиной 50 мм каждый, со значительно бóльшим окном: $X_{S2} \times Y_{S2} = 2.3 \times 1.05 \text{ м}^2$.

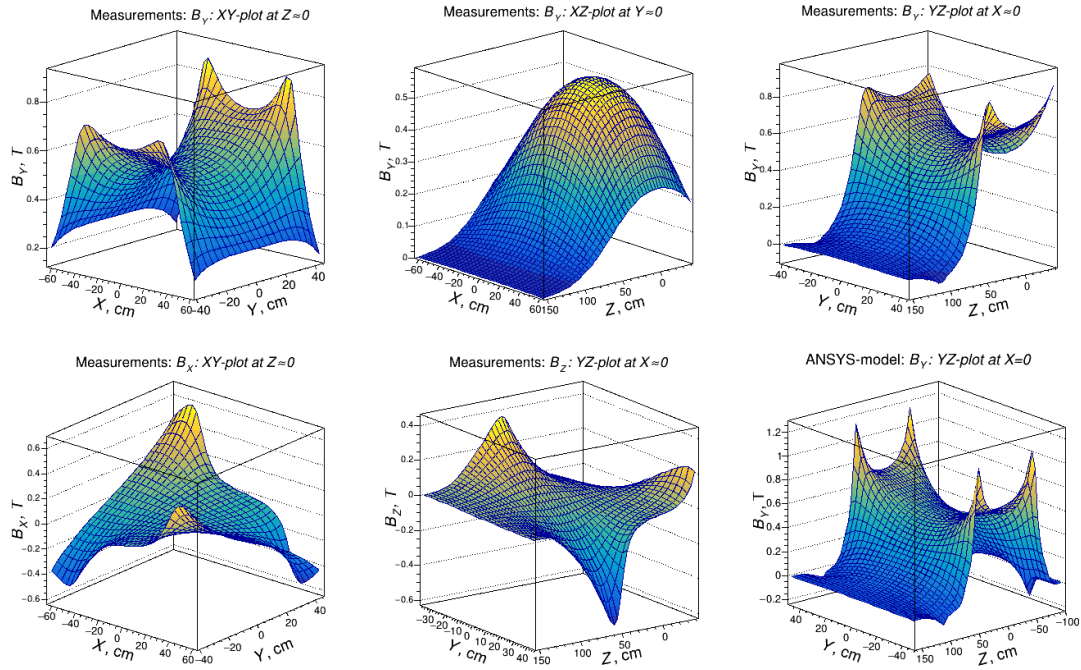


Рис. 4. Некоторые распределения поля в апертуре магнита в плоскостях, проходящих через его центр. Пять из 6-ти распределений взяты из измерений, а 6-е (в правом нижнем углу) – результат численного моделирования с использованием программы ANSYS [7]. Начало координат выбрано в центре магнита, т.е. на середине прямого отрезка, соединяющего центры полюсов.

Измерения топографии магнитного поля с помощью представленной здесь СМИ были выполнены при номинальном токе питания магнита 1 кА/виток обмотки на решётке с шагом 4 см по каждой из координат в рабочем объёме, размерами $X_f \times Y_f \times Z_f = 124 \times 84 \times 196 \text{ см}^3$, который практически полностью перекрывает рабочий угловой аксептанс $\sim \pm 110$ мрад [1,2] установки СПАСЧАРМ для вторичных частиц в обеих, XZ и YZ плоскостях. К сожалению, область измерений вдоль оси Z была ограничена невозможностью продвинуть СМИ в штатной конфигурации вверх по пучку за передний экран, расположенный при $Z \approx -0.85$ м. Представление о том, как выглядит поле магнита СПАСЧАРМ в нескольких плоскостях, даёт Рис. 4.

Процедура измерения топографии поля в рабочем объёме состояла из серии прогонов кассеты с датчиками Холла вдоль оси Z вверх по пучку и обратно в 32-х фиксированных поперечных горизонтальных X -положениях каретки, которые устанавливались вручную по линейке. Измерения поля осуществлялись во время $50 \times 2 = 100$ остановок движения по Z с интервалом 4 см. В каждой остановке в течение ~ 2 секунд производилось по 1000 синхронных считываний данных с каждого из 66 датчиков Холла. Синхронно с ними считывались и запи-

сывались показания токовых мониторов и температурных датчиков. Полный цикл измерений был выполнен примерно за 10 часов работы в течение одного дня, не считая нескольких дней подготовки и настройки системы. В частности, во время настройки СМИ до и после измерений были уточнены в обесточенном магните и, где необходимо, откорректированы значения пьедесталов всех измерительных каналов.

2.1. Временная стабильность измерительных каналов и точность позиционирования датчиков

Контроль стабильности системы в целом и отдельных её составляющих было уделено особое внимание. В дополнение к мониторингованию тока питания магнита, дрейф самого поля в течение всего цикла измерений отслеживался двумя ЯМР-датчиками [6], зафиксированными в центрах полюсов. На их показания осуществлялась и нормировка абсолютной величины магнитной индукции. По данным ЯМР вариации поля магнита за 10 часов измерений не превысили $\sim 0.02\%$.

Для оценки стабильности измерительных каналов и позиционирования кассеты прогнаны для нескольких, одних и тех же значений X -координаты были повторены по 2-3 раза: в начале, в середине и в конце цикла измерений. Вариации чувствительности каналов оценивались из сравнения показаний датчиков Холла в области экстремумов зависимостей $B(Z)$ для соответствующих компонент индукции, где производная dB/dZ близка к нулю. Оцененная таким образом стабильность каналов измерений оказалась очень хорошей: вариации показаний не превышали $\sim \pm 0.2$ мТл, что составляет $\sim \pm 0.04\%$ от величины поля в центре магнита.

Повторяемость позиционирования датчиков вдоль координаты Z была оценена как по вариациям положений экстремумов $B(Z)$ -зависимостей путём фитирования их окрестностей параболами, так и из разностей показаний датчиков в зонах, где производные dB/dZ , напротив, максимальны. Было установлено, что в проходах «туда», т.е. вверх по пучку вдоль оси Z , повторяемость Z -позиционирования была не хуже, чем $\sim \pm 0.1$ мм. Вдали от полюсов магнита, где градиенты dB/dZ не превышают ~ 1 мТл/мм, такие смещения ведут к пренебрежимо малым ошибкам измерения $\sim \pm 0.1$ мТл. Вблизи же рёбер и углов полюсов, где градиенты достигают ~ 5 мТл/мм, ошибка возрастала до $\sim \pm 0.5$ мТл $\approx \pm 0.1\%$ от величины индукции в центре магнита. Точность и повторяемость позиционирования проходов по координате X , которая

выставлялась вручную по линейке, были оценены таким же образом. Они оказались заметно хуже, чем по Z , на уровне $\sim\pm(0.4-0.5)$ мм.

Было проведено сравнение позиционирования датчиков также в проходах вверх по пучку и обратно. Здесь картина оказалась несколько иной. В данных явно был виден люфт до (2-3) мм в виде «отставания» тележки в проходах «обратно». Более того, величина этого отставания зависела как от X -координаты прохода, так и от позиции датчика Холла в кассете по вертикали. Т.е., по-видимому, в обратных проходах возникал как горизонтальный перекося тележки, так и несколько изменялся ещё и наклон кассеты. Учёт всех этих люфтов и перекося, а так же их повторяемости и временной стабильности сильно усложнил бы и удлинил обработку данных. Но главное, что в этом не было никакой необходимости в свете того, что в проходах вверх по пучку система показала очень высокую стабильность и повторяемость. Поэтому в анализе данные из «обратных» проходов кассеты не использовались.

2.2. Тонкая настройка взаимной ориентации датчиков Холла

Как было отмечено в разделе 1.4 выше, точность измерений взаимной ориентации датчиков Холла во время калибровки оказалась недостаточно высокой. Иллюстрацией к тому, о чём идёт речь, является Рис. 5, где на трёх картинках в верхней строке Y -датчик № 3 явно выпадает из плавной зависимости $B_Y(X, Y, Z)$ вдоль координаты Y , чего не может быть для гармонической функции вдали от проводников с током и ферромагнитных полюсов. Причём в области, где компонента B_Z отрицательна, Y -датчик № 3 проваливается в сравнении с соседними датчиками № 2 и № 4, а там, где B_Z положительна, выскакивает вверх. Эти нерегулярности были устранены (нижняя строка Рис. 5) внесением единственной поправки в предположении, что Y -датчик № 3 повернут в YZ -плоскости относительно соседей на 41 мрад = 2.35° .

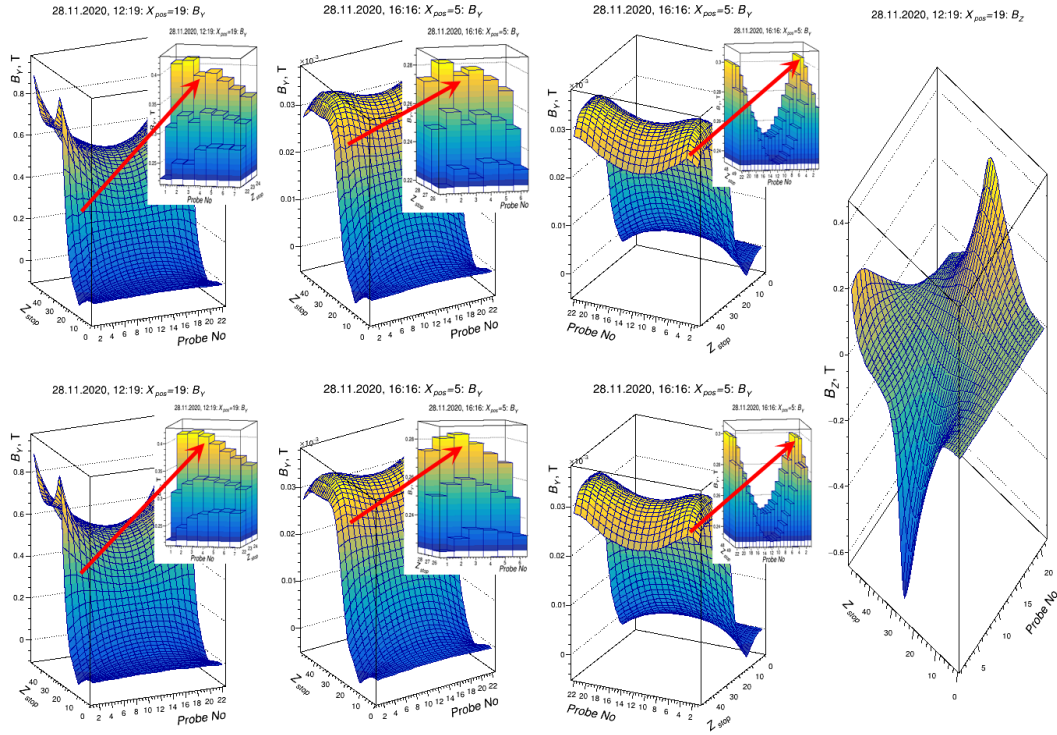


Рис. 5. Иллюстрации к поправкам на ориентацию Y -датчика № 3: верхняя строка — до корректировки угла α_{YZ} (см. обозначения в уравнениях (2) ниже); нижняя строка — после корректировки. Первый столбец слева — B_Y в YZ -сечении при $X_{pos} = 19$ (середина апертуры) с крупным планом для интервала $22 \leq Z_{stop} \leq 24$; второй столбец — B_Y в YZ -сечении при $X_{pos} = 5$ (край апертуры по оси X) с крупным планом для интервала $26 \leq Z_{stop} \leq 28$; третий столбец — другой ракурс того же YZ -сечения при $X_{pos} = 5$, но с крупным планом для интервала $48 \leq Z_{stop} \leq 49$. На крайнем справа рисунке показано распределение продольной компоненты поля B_Z в YZ -сечении при $X_{pos} = 19$.

Заметим, что на Рис. 5 - 7 используются рабочие координаты $X_{pos}, Y_{pos} \equiv Probe\ No$ и Z_{stop} , которые принимают целочисленные значения в узлах измерительной решётки с шагами: $S_x=3.99\text{ см}, S_y=4.00\text{ см}, S_z=4.03\text{ см}$. Они связаны с обычными X - Y - Z координатами соотношениями, полученными из геометрической привязки (см. раздел 2.3 ниже): $X \simeq S_x X_{pos} - 74.04\text{ см}; Y \simeq -S_y Y_{pos} + 48.26\text{ см}; Z \simeq -S_z Z_{stop} + 157.23\text{ см}$.

Необходимость дополнительной коррекции взаимной ориентации датчиков стала очевидной после изучения распределений для компонент B_X и B_Z , например, показанных в верхней строке Рис. 6. Выбранные для этой иллюстрации плоскости являются плоскостями антисимметрии для меняющихся знак компонент B_X и B_Z . Следовательно, в этих плоскостях B_X и B_Z

близки к нулю². Видно, что абсолютные величины B_X и B_Z здесь действительно меньше на порядок и более, чем в других областях апертуры (см., например, Рис. 4). Но их распределения очень далеки от гладких с прыжками B_X от датчика к датчику до ~ 6 мТл, а B_Z — до ~ 20 и даже 30-40 мТл (датчик из уже знакомой нам тройки № 3). Стоит подчеркнуть, что такие нерегулярности не могут быть вызваны здесь ни уходом пьедесталов, которые были выровнены с точностью до десятых долей мТл, ни плаванием калибровочных коэффициентов, которые для создания столь сильного эффекта должны были бы уйти на десятки процентов. Таким образом, для исправления картины и здесь остаётся единственный инструмент: настройка углов взаимной ориентации датчиков Холла.

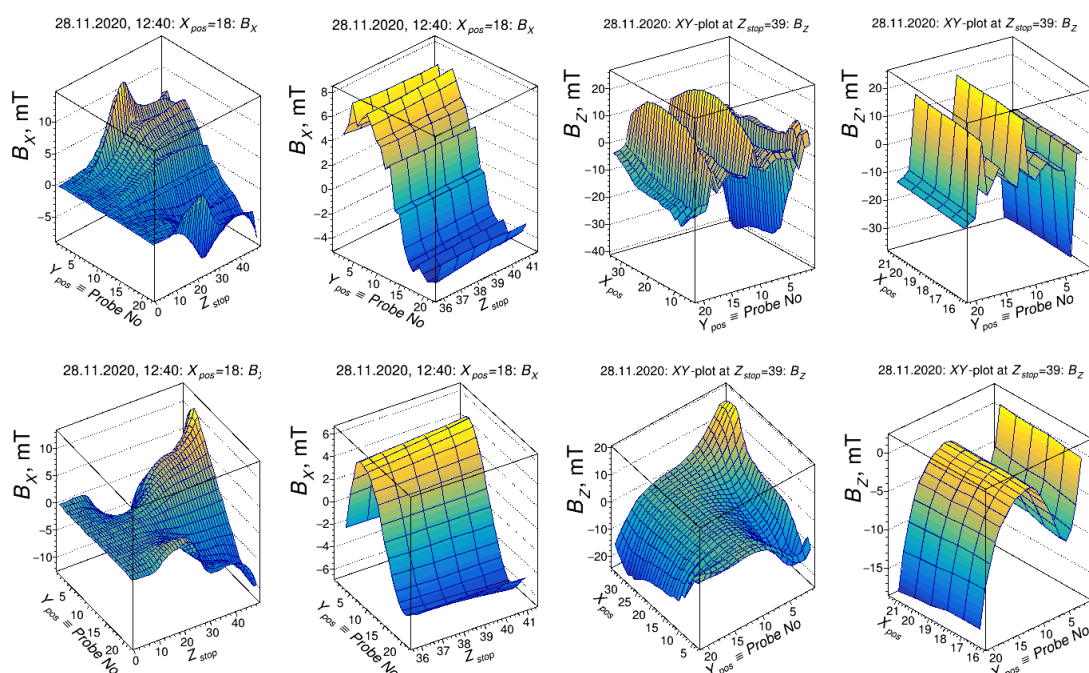


Рис. 6. Некоторые распределения для измеренных B_X и B_Z компонент поля с взаимной ориентацией датчиков из калибровок (верхняя строка) и с исправленной ориентацией по данным рабочим измерениям на магните СПАСЧАРМ (нижняя строка). В первом слева столбце представлена компонента B_X в YZ -плоскости при $X_{pos} = 18$, а во втором столбце — область $36 \leq Z_{stop} \leq 41$, вырезанная из этих распределений. В третьем слева столбце показана компонента B_Z в XY -плоскости при $Z_{stop} = 39$, а в крайнем правом столбце — область $16 \leq X_{pos} \leq 21$, вырезанная из этих распределений.

²Точного равенства нулю ожидать, конечно, не следует, прежде всего, из-за неизбежно присутствующих смещений и перекосов осей системы перемещения относительно осей симметрии поля.

Результаты работы по исправлению распределений для тех же плоскостей показаны в нижней строке Рис. 6. Видно, что операция вполне удалась, и распределения стали довольно гладкими. На начальной стадии она заключалась в «ручной работе» по коррекции по соседям нескольких особо выпадающих датчиков, в частности, Z-датчиков № 3, 11 и 18. И далее использовалась процедура сглаживания распределений с помощью полиномиальных фитов, которую иллюстрирует Рис. 7.

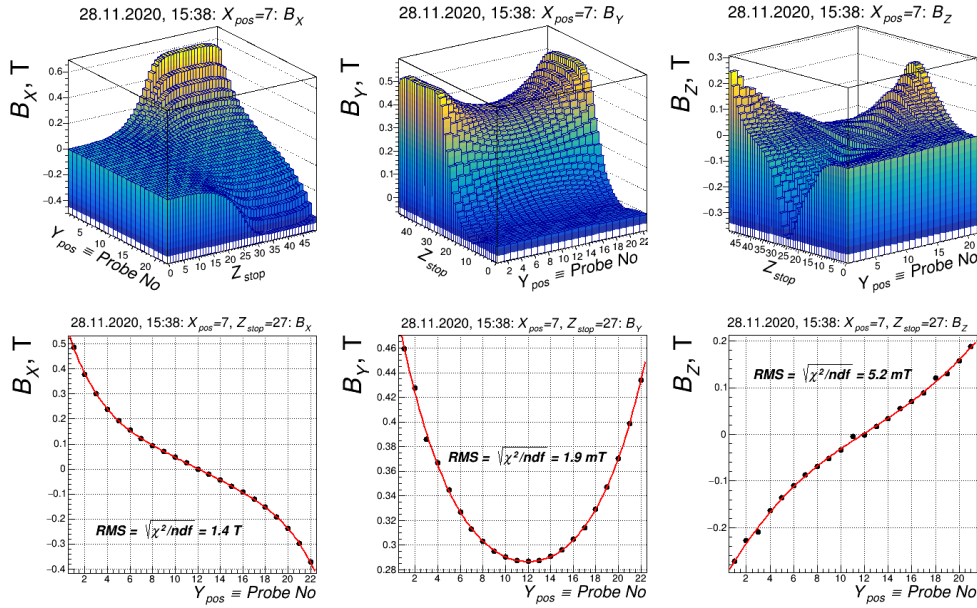


Рис. 7. Иллюстрация к процедуре коррекции взаимной ориентации датчиков путём сглаживания измеренных распределений поля в магните СПАСЧАРМ. Все показанные в нижней строке полиномиальные фиты сделаны в предположении одинаковых единичных ошибок для всех точек. *RMS* отражает средне квадратичное отклонение для этих фитов. Детали в тексте.

В этой процедуре выбирается несколько точек в плоскости X - Z , где все компоненты поля большие и с ясно обозначенными Y -зависимостями³ $B_X(Y_{pos})$, $B_Y(Y_{pos})$ и $B_Z(Y_{pos})$. В иллюстрациях нижней строки Рис. 7 эти зависимости выбраны в точке $X_{pos} = 7$, $Z_{stop} = 27$. Затем эти распределения фитируются, например, полиномиальными функциями $f_X(Y_{pos})$, $f_Y(Y_{pos})$ и $f_Z(Y_{pos})$ и для каждого датчика вычисляются разности: $\Delta B_X^i = B_X(Y_{pos}^i) - f_X(Y_{pos}^i)$, $\Delta B_Y^i = B_Y(Y_{pos}^i) - f_Y(Y_{pos}^i)$ и $\Delta B_Z^i = B_Z(Y_{pos}^i) - f_Z(Y_{pos}^i)$, $i=1, 2, \dots, 22$. В предположении, что за

³Распределения, показанные на Рис. 6, для этих целей не годятся, потому что из-за неизвестных перекосов систем координат «правильное» поведение функций $B_X(Y)$ и $B_Z(Y)$ вблизи плоскостей антисимметрии может быть весьма причудливым и практически непредсказуемым.

все ΔB ответственны исключительно 6 углов поворотов датчиков α , получаем для них следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta B_X^i &= \alpha_{XY} B_Y(Y_{pos}^i) + \alpha_{XZ} B_Z(Y_{pos}^i) \\ \Delta B_Y^i &= \alpha_{YX} B_X(Y_{pos}^i) + \alpha_{YZ} B_Z(Y_{pos}^i) \\ \Delta B_Z^i &= \alpha_{ZX} B_X(Y_{pos}^i) + \alpha_{ZY} B_Y(Y_{pos}^i) \end{aligned} \quad i = 1, 2, \dots, 22 \quad (2)$$

Таким образом, в каждой X - Z точке, для каждого датчика Холла получается по одному уравнению для двух неизвестных – углов поворота α данного датчика в двух плоскостях относительно других датчиков. В результате осуществления такой процедуры более, чем в двух X - Z точках, с существенно отличающимся поведением зависимостей $B_X(Y_{pos})$, $B_Y(Y_{pos})$ и $B_Z(Y_{pos})$, получаются переопределённые системы из более, чем двух уравнений⁴ для каждой пары неизвестных, которые решаются, например, методом наименьших квадратов. Правильный выбор набора X - Z точек для сглаживания является здесь абсолютно критичным для того, чтобы надёжно отделить последствия неточного знания ориентации датчиков от последствий ошибок в чувствительности каналов измерений и в знании их пьедесталов.

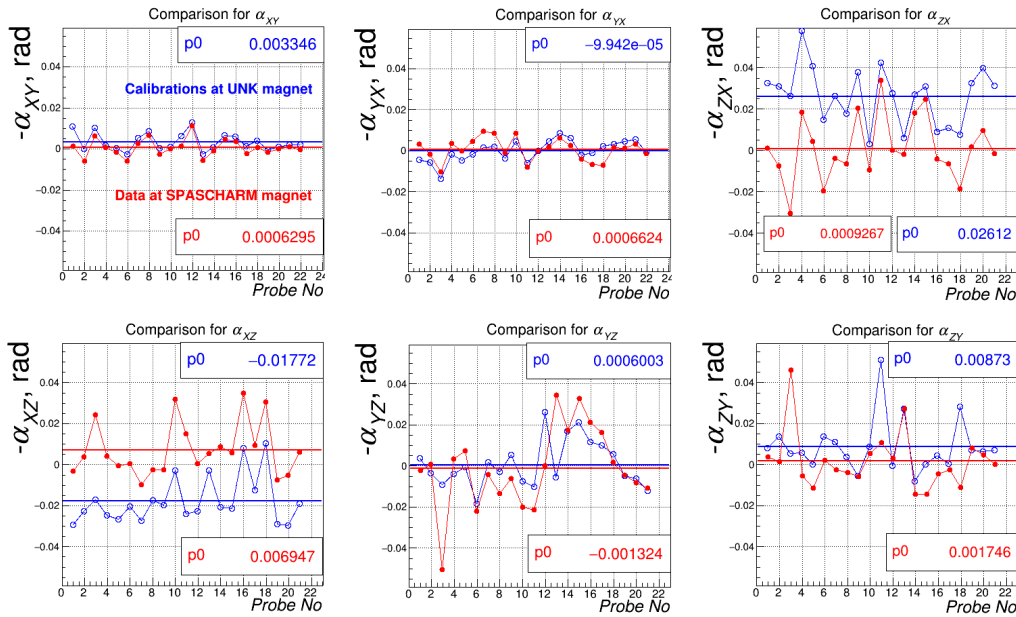


Рис. 8. Сравнение относительных углов поворота датчиков, найденных в калибровочных измерениях (синие графы) и в результате настройки по рабочим измерениям на магните СПАСЧАРМ (красные графы).

⁴В обсуждаемом здесь анализе сглаживание производилось не менее, чем по 4-м X - Z позициям.

Результатом описанной выше процедуры является приведение ориентации всех датчиков, исходно предназначенных для измерения одной и той же компоненты поля, к некой «усреднённой» единой плоскости. Ориентация же самих этих трёх плоскостей определяется на стадии глобальной геометрической привязки СМИ к системе координат магнита (раздел 2.3 ниже).

На Рис. 8 приведено сравнение углов поворотов α , полученных в калибровках (раздел 1.4) и на рабочих данных. Видно, что как сами величины углов, так и - для некоторых групп датчиков - их разности с калибровочными измерениями весьма значительны и достигают ~ 50 мрад $\approx 3^\circ$.

2.3. Сравнение расчётов и измерений и геометрическая привязка

Для сравнения расчётной и измеренной карт магнитного поля необходимо, прежде всего, расположить в расчётной Декартовой системе координат координатную систему перемещения датчиков Холла, строго говоря, не являющуюся ни ортогональной, ни даже, как оказалось, с прямолинейными осями. Упомянутые особенности были выявлены уже в прямых геодезических измерениях по привязке системы перемещения к железу спектрометрического магнита при помощи линейки и лазерного дальномера типа *Leica DISTO*.

На следующем этапе была осуществлена подгонка расчётов и измерений методом наименьших квадратов с использованием 24-х свободных параметров: 23 геометрических, таких, как три шага измерительной решётки; три относительных сдвига координат; углы между осями и поправки на отклонения их от прямолинейности; ориентации в расчётной системе средних по датчикам плоскостей измерения и др. – плюс абсолютная нормировка величины индукции. Были рассмотрены несколько вариантов подгонки: по всему измеренному объёму – всего 101,920 пар чисел для сравнения; по центральной полосе $|Y| < 30$ см, все точки которой удалены от полюсов не менее, чем на 20 см – 70,560 пар чисел; по центральной выборке с участием только двух поперечных компонент индукции B_X и B_Y – 47,040 пар чисел.

По фитам в центральной полосе значения найденных геометрических параметров вполне удовлетворительно согласуются с прямыми геодезическими измерениями. Так цифры для положения центральной седловины компоненты B_Y вдоль горизонтальной оси X совпали с точностью ~ 0.1 мм, по вертикали Y – с точностью $\sim (0.5-1)$ мм, расхождение вдоль продоль-

ной оси Z составило $\sim(2-5)$ мм. По другим геометрическим параметрам также имеется согласие в пределах ожидаемых ошибок геодезических измерений.

В центральной полосе вдали от полюсов среднеквадратичное отклонение (RMS) расчётов и измерений по двум поперечным компонентам даёт оценку погрешности измерений $\delta B \approx \pm 0.95$ мТл $\approx \pm 0.18\%$ от индукции ~ 0.54 Тл в центре магнита, а по всему измеренному объёму $\delta B \approx \pm 1.9$ мТл $\approx \pm 0.35\%$. Ухудшение RMS около полюсов связано с высокой чувствительностью там к позиционированию датчиков, а также с ухудшением точности расчётов вблизи острых рёбер и углов ферромагнитных полюсов. Включение в подгонку продольной компоненты B_z ещё несколько ухудшает цифры по δB : до $\sim \pm 1.1$ и $\sim \pm 2.3$ мТл, соответственно. Здесь главным виновником является, по-видимому, повышенная чувствительность расчётной B_z к граничным условиям в области защитных экранов, особенно переднего, расположенного близко к центру магнита и частично перекрывающему его апертуру. Однако и требования к точности знания компоненты B_z сильно пониженные, поскольку её вклад в отклонение вторичных заряженных частиц пропорционален квадрату угла вылета частицы относительно исходного пучка, что даже на границе аксептанса установки $\sim \pm 110$ мрад даёт фактор $\sim 1/100$.

Некоторые иллюстрации к сравнению расчётов и измерений представлены на Рис. 9 в терминах интегралов поля вдоль оси Z . Показаны только две поперечные компоненты, которые вносят доминирующий вклад в отклонение в магните заряженных частиц, летящих под малыми углами к оси Z . По среднеквадратичным отклонениям от нуля для всей показанной X - Y -плоскости имеет место согласие в пределах $\sim \pm 0.3\%$ для интеграла от B_x и в пределах $\sim \pm 0.18\%$ - от B_y . Вдали же от полюсов (при $|Y| < 30$ см) согласие лучше: $\sim \pm 0.14\%$ для обеих компонент.

По абсолютной нормировке, в среднем по объёму, расчётная и измеренная магнитные индукции практически совпали: разница составляет $\sim 0.13\%$ при ошибке процедуры сравнения, оцененной в $\pm 0.15\%$. Измеренная индукция в центре магнита равна 0.5398 ± 0.0004 Тл, а интеграл поля вдоль оси магнита равен 0.703 ± 0.001 Тл·м. Отсюда оценка эффективной длины поля магнита: ~ 1.3 м. Величина рассеянного поля в зоне ближайшего трекового детектора выше по пучку достигает примерно 15-17 мТл, а в зоне ближайшего детектора ниже по пучку — ~ 0.2 мТл.

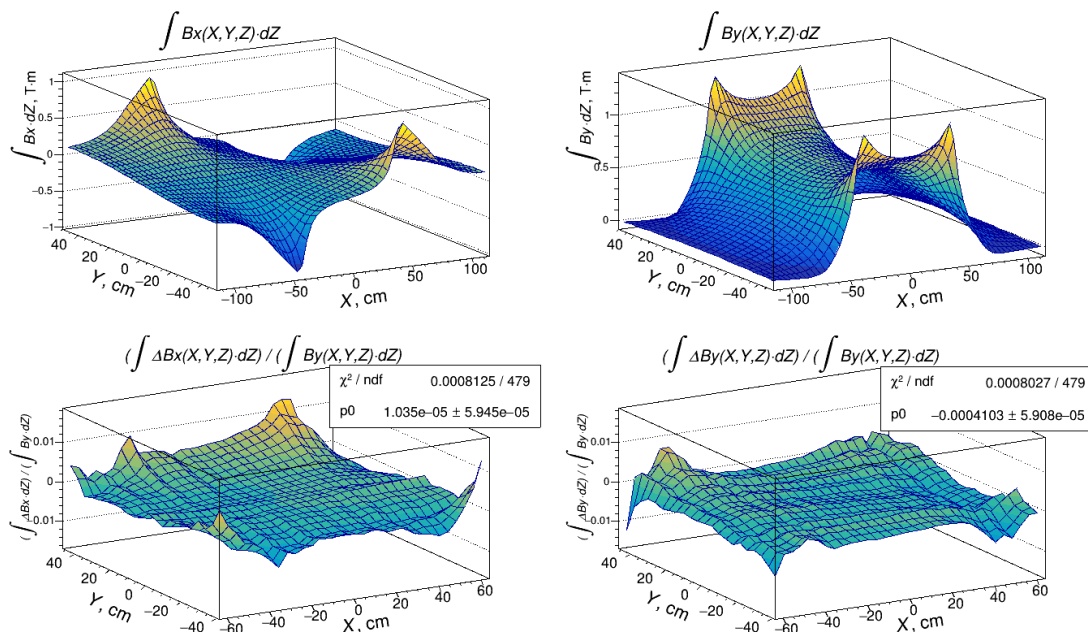


Рис. 9. Иллюстрация к степени согласия расчётов и измерений по интегралам вдоль оси Z (параллельно пучку) от поперечных компонент поля B_x и B_y . Верхняя строка: расчётные распределения интегралов в поперечной плоскости X - Y для полной апертуры магнита. Нижняя строка: относительные разности между расчётными и измеренными интегралами, нормированные на интегралы от основной компоненты B_y , для части апертуры, где были сделаны измерения. Обозначение: $\Delta B(X,Y,Z) = B_{\text{расчёт}}(X,Y,Z) - B_{\text{измерения}}(X,Y,Z)$. В нижней строке числа в стат-боксах соответствуют фитированию константой с единичными ошибками 2D-распределений в полосе $|Y| < 30$ см.

3. Дальнейшее развитие системы магнитных измерений

Как неоднократно отмечалось выше, высокая точность, стабильность и предсказуемость позиционирования датчиков Холла является абсолютно необходимым условием достижения высокой точности магнитных измерений. В измерениях на спектрометрическом магните СПАСЧАРМ механика автоматического перемещения датчиков вдоль одной из горизонтальных осей, оси Z , продемонстрировала очень хорошую стабильность и повторяемость позиционирования кассеты – значительно лучше, чем ручное позиционирование по другой горизонтальной оси - оси X . В рамках модернизации настоящей системы магнитных измерений было введено и отлажено автоматическое перемещение кассеты с датчиками также и вдоль второй горизонтальной оси с использованием точно такой же механики привода, как и вдоль оси Z . Несомненно, это позволит улучшить точность

будущих измерений, а также практически исключить затраты времени на ручное перемещение каретки.

В измерениях на магните СПАСЧАРМ, а также ранее на магните СВД [3,4] считывание (опрос) показаний датчиков Холла осуществлялось во время остановок кассеты с датчиками в узлах решётки. Однако, дизайн настоящей СМИ позволяет производить считывание и в движении без остановки тележки, что придаёт дополнительную гибкость в использовании системы и, как правило, ведёт к сокращению времени измерений.

На Рис. 10 показано в графике сравнение использования СМИ в двух режимах на примере измерения остаточного поля в обесточенном магните СПАСЧАРМ: слева – со считываниями показаний датчиков в «статике» во время остановок кассеты в узлах решётки с шагом 4 см; справа – в движении кассеты вдоль оси Z с постоянной скоростью ~ 5 см/сек. Частота опроса в обоих режимах была одинаковой и равной 50 Гц. В статике в каждой 1-секундной остановке производилось по 50 считываний.

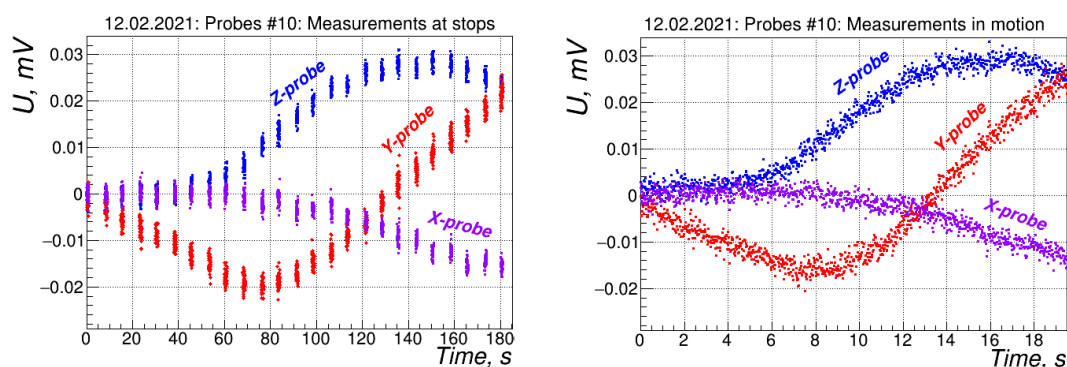


Рис. 10. Сравнение работы трёх датчиков Холла из группы №10 в остаточном поле обесточенного магнита СПАСЧАРМ на длине 96 см при считывании сигналов во время 25 остановок кассеты с шагом 4 см (слева) и в непрерывном движении вдоль оси Z со скоростью ~ 5 см/сек (справа). В обоих режимах частота считываний $f_R = 50$ Гц. Каждая точка на графиках представляет собой единичное считывание. Детали в тексте.

Обращает внимание, прежде всего, что время измерений в движении на длине 96 см составило меньше 20 секунд, в то время, как статические измерения заняли 181 секунду, т.е. почти в 10 раз больше. Из них $1 \times 25 = 25$ секунд ушло на 25 считываний в каждой остановке. Но главная потеря времени в статическом режиме была из-за существенно меньшей средней скорости перемещения тележки, которая составляла всего ~ 0.6 см/сек и ограничивалась опасностью неприемлемого раскачивания системы в режиме постоянных ускорений и торможения.

ний тележки⁵. В другом же режиме плавное ускорение до ~ 5 см/сек и успокоение колебаний системы в начале движения занимало $\sim(3-4)$ секунды на длине $\sim(10-15)$ см, и далее кассета двигалась с постоянной скоростью.

При измерениях в движении результат каждого отдельного считывания представляет собой, фактически, среднее значение показаний каждого из датчиков Холла за время $1/f_R$, которое в представленном здесь исследовании составляло ~ 0.02 сек. При скорости 5 см/сек это соответствует усреднению магнитной индукции по отрезкам оси Z , длиной 1 мм, что вполне приемлемо в большинстве практических задач. В частности, если бы основные измерения на магните СПАСЧАРМ (раздел 2 выше) осуществлялись в таком режиме, то относительная ошибка каждого считывания, ассоциированная с усреднением даже по более длинным отрезкам, например, до 10 мм, нигде не превысила бы ~ 0.01 мТл $\approx 2 \cdot 10^{-5}$ от индукции в центре магнита.

Можно было бы ожидать, что при измерениях в движении возрастут шумы из-за наводок от цепей управления одновременно работающими шаговыми двигателями. В проведенном эксперименте никакой значимой разницы в уровне шумов в режимах с остановками и в движении обнаружено не было. Для датчиков из группы № 10, показанных на Рис. 10, среднеквадратичные флуктуации на частоте считывания $f_R = 50$ Гц в обоих случаях практически одинаковы и укладываются в диапазон $\sim(1.3-1.5)$ мкВ. Эти цифры близки, но несколько выше $\sim(0.8-1.1)$ мкВ, предсказываемых зависимостью $\sim\sqrt{f_R/f_D}$ из наблюдаемых ранее $\sim(2.5-3.5)$ мкВ на частоте $f_R = 500$ Гц. Причиной расхождения является присутствие в шумах когерентных низкочастотных компонент, не подчиняющихся зависимости $\sim\sqrt{f_R/f_D}$.

Таким образом, как с точки зрения шумов, так и усреднения поля по отрезкам любой длины до 10 мм и даже более, режим работы со считыванием показаний датчиков Холла в движении без остановок кассеты выглядит вполне приемлемым в практическом плане и даже предпочтительным для типичных задач применения обсуждаемой здесь СМИ. Параметры конкретного режима работы: скорость движения, частота считываний, их аппаратное или программное усреднение и пр. определяются условиями и целями решаемой задачи и задаются программными установками.

⁵Основные измерения на магните СПАСЧАРМ, описанные в разделе 2, производились при такой же средней скорости.

Заключение

В данной работе представлена многоканальная система магнитных измерений поля в больших объёмах на основе датчиков Холла, разработанная и созданная в НИЦ «Курчатовский Институт» - ИФВЭ. Эта система дважды была успешно использована для измерений топографии поля в широкоапертурных спектрометрических магнитах физических установок СВД [3,4] и СПАСЧАРМ [1,2] на ускорителе У-70 ИФВЭ. В описанных здесь измерениях для эксперимента СПАСЧАРМ была достигнута относительная точность восстановления магнитной индукции и её отклоняющей силы для заряженных частиц $\sim \pm(0.15-0.3)\%$. Это обеспечивает возможность достижения целевой точности $\sim \pm 0.4\%$ [2] и лучше в измерениях импульсов заряженных вторичных частиц.

Здесь представлено также дальнейшее развитие настоящей СМИ и изучение её возможностей для улучшения точности и сокращения времени измерений. В частности, показано, что режим со считыванием показаний датчиков Холла в движении позволяет существенно сократить время измерений, обеспечивая при этом достаточную точность при квази-непрерывном покрытии данными вдоль оси движения с требуемыми частотой считывания и длиной усреднения показаний датчиков. Несомненным достоинством представленной здесь СМИ является её высокая гибкость, позволяющая легко подстраивать параметры системы под конкретные задачи заданием соответствующих программных установок.

Авторы выражают признательность А.И. Иваненко – за помощь в калибровочных измерениях на магните УНК, а также В.Н. Рядовинову – за полезные обсуждения.

Работа поддержана и частично профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ, проект "Новые явления в физике элементарных частиц и ранней Вселенной" № FSWU-2023-0073.

Работа выполнена в НИЦ КИ-ИФВЭ при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 22-12-00164).

Список литературы

1. A.P. Meschanin, et al. Magnets of the SPASCHARM Experiment at the U-70 Accelerator Facility. *Physics of Atomic Nuclei*, 85, No. 12, 2043-2052 (2022)
2. В.В. Абрамов и др. Концептуальный проект эксперимента СПАСЧАРМ. *ЭЧАЯ*, 54, вып. 1, 6-189 (2023)
3. В.Н. Алферов, Д.А. Васильев, В.Ф. Головкин, П.П. Коробчук, А.В. Лутчев, В.Х. Маляев, В.Н. Рядовиков, В.А. Соловьев, В.Н. Федорченко, А.Н. Холкин. Система измерения магнитного поля установки СВД-2. *ПТЭ*, 2019, № 3, с. 157–159
4. В.Н. Алферов, Д.А. Васильев, В.Ф. Головкин, П.П. Коробчук, А.В. Лутчев, В.Х. Маляев, В.Н. Рядовиков, В.А. Соловьев, В.Н. Федорченко, А.Н. Холкин. Измерение магнитного поля установки СВД-2. *Препринт ИФВЭ 2018-2*, Протвино, 2018
5. В.И. Балбеков, К.Ф. Герцев, Н.Л. Смирнов, С.В.Трофимов. Измерение нелинейностей магнитного поля диполей УНК методом гармонического анализа. *Препринт ИФВЭ УНК*, 1982
6. Г.В. Карпов, А.С. Медведко, Е.И. Шубин, Прецизионные магнитометры на основе ЯМР в стандарте VME. *Препринт ИЯФ СО АН РФ 2004-55*, Новосибирск 2004
7. H.-H. Lee, *Finite Element Simulations with Ansys Workbench 17*. SDC Publications. p.50. ISBN 978-1-63057-088-0. (2017)

Рукопись поступила 28 сентября 2023 г.

В.Н. Алфёров и др.

Система измерения поля в широкоапертурных магнитах физических установок на ускорительном комплексе У-70.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	29.09.2023	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.	
Печ.л. 1,6.	Уч.– изд.л. 2,3.	Тираж 60.	Заказ 13.	Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2023-12,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2023
