12

Мониторинг магнитного поля в диполях с постоянными магнитами накопителя „СКИФ“

© А.М. Батраков,[1] В.В. Кобец,[1] Г.В. Карпов,[1] И.Н. Окунев,[1,2] А.Ю. Пахомов,[1] С.В. Синяткин,[1] Д.П. Черновский[1,3]

[1] Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия
[2] Центр коллективного пользования „СКИФ“, Новосибирск, Россия
[3] Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
e-mail: i.n.okunev@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 27 февраля 2026 г.
В окончательной редакции 25 июня 2026 г.
Принято к публикации 28 августа 2026 г.

Описана система мониторинга магнитного поля в дипольных магнитах накопителя СКИФ (BPC-диполях), в конструкции которых используются постоянные магниты. Изложены причины, инициировавшие создание системы мониторинга, и рассмотрены возможные методики измерений полей, реализуемые в этой системе. Описаны аппаратные средства, позволяющие достигнуть необходимого качества измерений и обеспечить тем самым финальную цель системы мониторинга — получение стабильного поля в BPC-диполях. Приведены результаты тестирования опытного варианта системы, включающего средства измерения и BPC-диполь.

Ключевые слова: постоянные магниты, диполи, ЯМР, датчик Холла.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64192.41-26

Введение

Одной из особенностей магнитной структуры накопителя ЦКП „СКИФ“ является применение диполей с постоянными магнитами, что объясняется привлекательным сочетанием компактности и возможности достижения необходимого поля 2.1 T. Однако отсутствие уверенности в стабильной намагниченности постоянных магнитов при эксплуатации инициировало создание средств, измеряющих как долговременные уходы (часы), так и кратковременные уходы поля (секунды) с целью его коррекции.

Для объяснения причин возникновения задачи мониторирования поля обратимся к конструкции диполя (рис. 1) [1]. Его полюса изготовлены из магнитопроводящей стали. На нижней и верхней половинках магнита установлены постоянные магниты таким образом, чтобы направить магнитный поток через медианную плоскость и получить дипольное магнитное поле 2.1 T. Нижняя половинка магнита показана на рис. 1. Между магнитами медианной плоскости предусмотрено место для установки датчиков, или в случае необходимости установки постоянных магнитов для усиления магнитного поля. Вакуумная камера занимает все пустое пространство между постоянными магнитами. В конструкцию магнита заложены обмотки активной коррекции, позволяющие получать необходимый интеграл поля, а также при эксплуатации подстраивать уходы поля по данным мониторинга. Обмотки запитаны от биполярного источника, что дает возможность варьировать величину поля на $\pm 5\,\%$.

Особенностью конструкции BPC-диполя является его малая длина в сравнении с зазором. Из-за этого распределение магнитного поля в продольном направлении имеет колоколообразную форму и схоже с поперечным (рис. 1). Параметры BPC-диполя приведены в табл. 1.

Одной из проблем элементов ускорителей с использованием постоянных магнитов является температурная зависимость индукции магнитного поля. На рис. 2 показана зависимость индукции магнитного поля BPC-диполя от температуры, измеренная при суточных изменениях температуры стенда на этапе проведения магнитных измерений, демонстрирующая изменение поля на $-19\,\mathrm{G}/^{\circ}\mathrm{C}$.

При изменениях температуры за достаточно длительное время (например, часовые или суточные) актуальное поле, хотя и требует специальных средств, измеряется и компенсируется достаточно легко. Однако коррекция поля вследствие температурного влияния существенно усложняется при инжекции в накопитель. Пучок электронов перепускается с темпом 1 раз в секунду в течение $1-2\,\mathrm{min}$, за которые копится около 400 mA. С ростом тока растет выделяемая в вакуумной камере мощность от воздействия синхротронного излучения пучка электронов (СИ). При максимальном токе пучка температура камеры на отдельных участках достигает после инжекции $47\,^{\circ}\mathrm{C}$, нагревая близкорасположенные постоянные магниты и ярмо в целом [2]. Главным источником нагрева от СИ в этой части камеры служат соседние дипольные магниты кольца накопителя. Выделение мощности концентрируется в нескольких местах

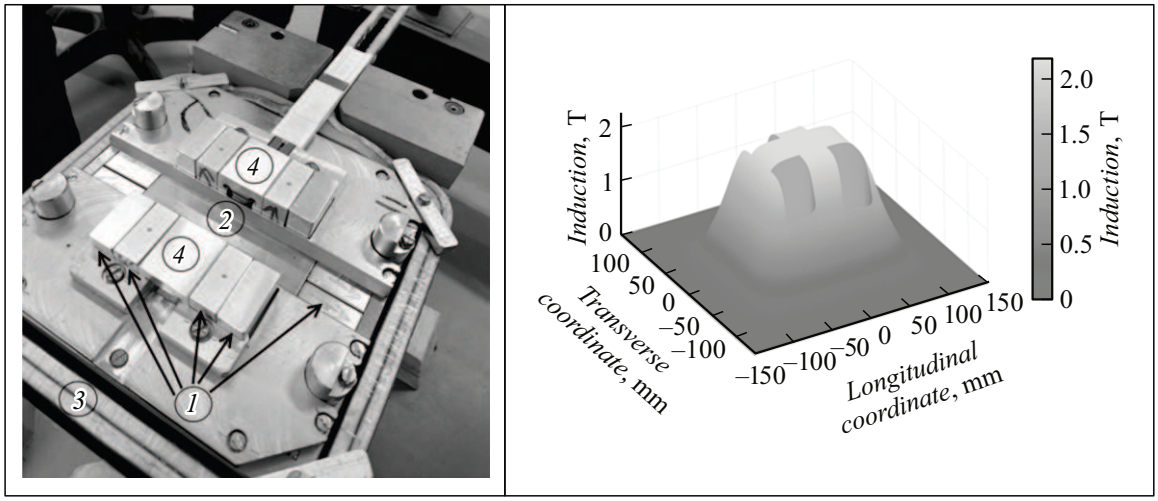


Рис. 1. Слева — половинка ВРС диполя: *1* — постоянные магниты, *2* — полюс, *3* — катушка коррекции, *4* — место для установки датчиков Холла. Справа — расчетное распределение индукции магнитного поля в медианной плоскости ВРС диполя.

Таблица 1. Параметры ВРС диполя

Параметр	Значение
Длина ярма с катушками	264.2 mm
Апертура	40 × 30 mm
Поле в центре магнита при $I_{corr} = 0$ при $I_{corr} = 782$ A (32 витка)	 2.207 T 2.445 T
Интеграл поля при $I_{corr} = 0$ при $I_{corr} = 782$ A (32 витка)	 0.333297 T·m 0.391984 T·m
Эффективная длина при $I_{corr} = 0$ при $I_{corr} = 782$ A (32 витка)	 0.151018 m 0.160321 m
Однородность интеграла дипольного поля $(\Delta \int B_y(x,z)ds / \int B_y(0,0)ds)$ при $I_{corr} = 0$ при $I_{corr} = 782$ A (32 витка)	 $2.77 \cdot 10^{-4}$ $4.28 \cdot 10^{-3}$
Количество ВРС диполей в накопителе	16

вдоль камеры по внешнему радиусу. Результаты расчета нагрева, выполненные с помощью конечно-элементного анализа в программе ANSYS CFX [3], представлены на рис. 3.

Как показывают оценки, изменение поля на 20 G в одном из диполей ВРС приводит к амплитуде отклонения пучка от равновесной орбиты 60 μm. Если задать разброс полей в ВРС-диполях, используя распределение Гаусса со среднеквадратичной величиной 20 G, то суммарная амплитуда отклонений достигает 250 μm, что приводит к недопустимым искажениям оптики, вызывающим нестабильность орбиты вплоть до гибели пучка.

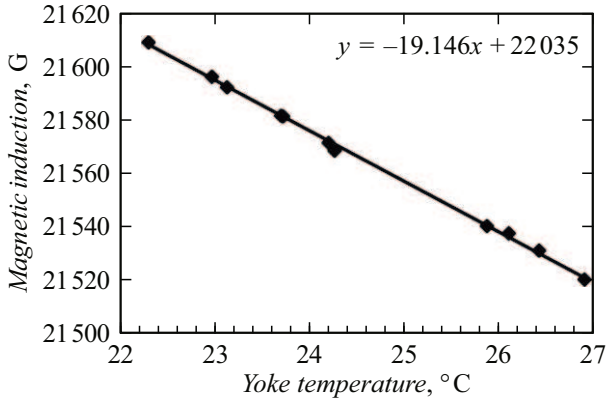


Рис. 2. Зависимость магнитного поля от температуры.

Характерные размеры пучка в точках излучения СИ на станции потребителей составляют 30 μm. Требования пользователей СИ на стабильность орбиты — 3 μm [4]. Очевидно, что искажения оптики необходимо своевременно корректировать, что предполагается делать в том числе и по величине измеренного в ВРС диполях магнитного поля.

Таким образом, возникает необходимость в системе, обеспечивающей на первом этапе измерение, а на втором — точную подстройку поля в ВРС диполях, что, в свою очередь, позволит достигнуть нестабильности орбиты пучка на уровне нескольких микрон.

1. Измерение магнитных полей в реальных ВРС-диполях

1.1. Возможные методики измерения полей и требования к погрешностям измерения

В первоначальной версии системы мониторинга предполагалось использовать ЯМР магнетометры [5]. Такое

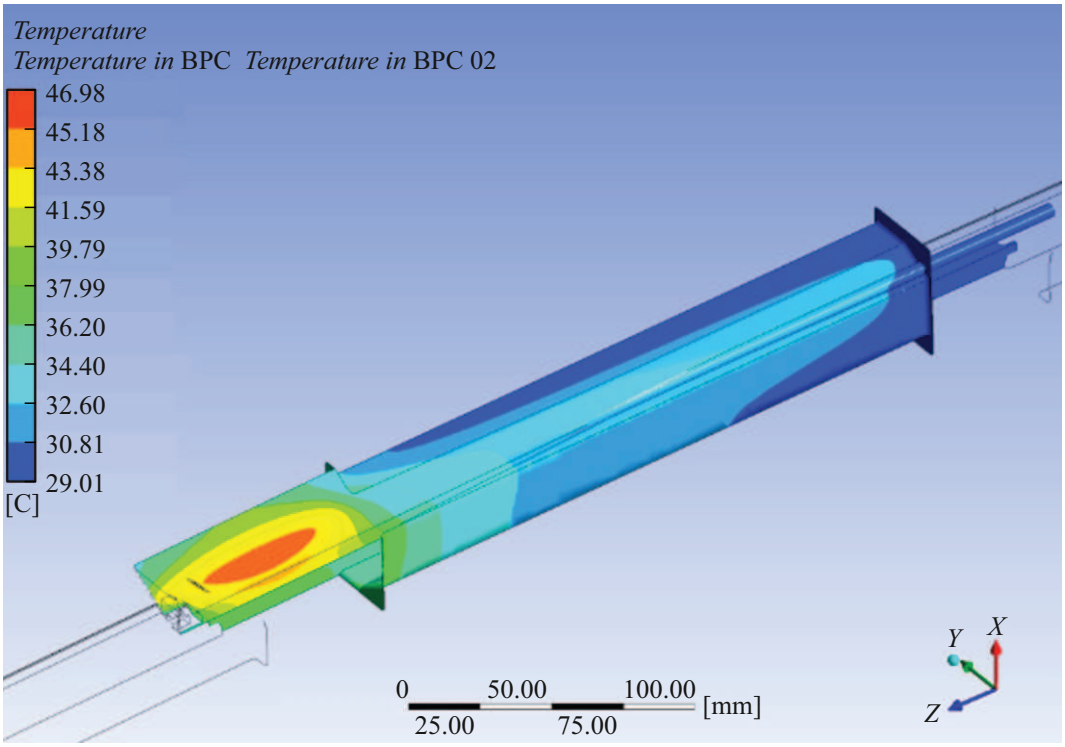


Рис. 3. Температурные поля камеры в области BPC диполя после инжекции. Максимальная температура — 47 °C.

решение основывалось на том, что в ИЯФ накоплен большой опыт изготовления и использования одно- и многоканальных магнитометров, и построение системы мониторинга для 16 магнитов не вызовет проблем с разработкой и изготовлением.

В то же время были опасения относительно надежной работы ЯМР магнетометра из-за заметных градиентов магнитного поля в предполагаемом месте установки датчика. В этой связи на стенде магнитных измерений была проведена экспериментальная проверка применимости ЯМР методики. Для этого ЯМР датчик сначала ставился в то место, где расположен центр вакуумной камеры BPC диполя (вакуумная камера отсутствовала) и проводились измерения. Затем датчик сдвигался в область, где должна быть внешняя поверхность вакуумной камеры плюс зазор 3 mm (корпус-экран датчика), т. е. в предполагавшееся место установки. Как показали эксперименты [6], во втором случае магнетометр не работал, так как в этой зоне неоднородность поля превысила допустимые величины, близкие к значению 2 G/mm. Добиться работоспособности магнетометра удалось в результате двух действий: уменьшения объема рабочего вещества и габаритов датчика (см. далее разд. 2) и приближения его к центру магнита насколько возможно, т. е. в зону меньшей неоднородности. С этой целью было принято решение фрезеровать на наружной поверхности камеры паз под датчик и кабель к нему (рис. 4).

Следует заметить, что при установке ЯМР-датчика в тело камеры его замена практически невозможна из-за непростой операции по разборке магнита на установке. Также ожидаемые проблемы в использовании метода ЯМР вызывал упоминавшийся выше быстрый, за несколько десятков секунд, нагрев вакуумной камеры. Во-первых, в момент нагрева появляются градиенты полей, которые могут повлиять на стабильность работы ЯМР-измерителя, а во-вторых, поиск изменяющегося поля с помощью ЯМР-метода может занять несколько десятков секунд, в результате чего коррекция поля в динамике при инжекции становится малореальной.

С учетом сказанного было принято решение об использовании дублирующей подсистемы на основе датчиков Холла. Датчики Холла не боятся неоднородных полей, поэтому могут устанавливаться сбоку от вакуумной камеры и, как следствие, доступны для демонтажа. Это обстоятельство представляется важным, так как в случае деградации от воздействия радиации датчики могут легко заменяться.

Отметим, что обе подсистемы могут работать, дополняя друг друга. Например, ЯМР-магнетометр может выполнять функции калибровки и проверки датчиков Холла в установившемся режиме, в свою очередь холловская подсистема работает в любом переходном режиме и ускоряет работу ЯМР-магнетометра при поиске поля (частоты).

Ранее отмечалось, что изменение поля в BPC-диполях на 20 G приводят к недопустимому искажению орбиты для потребителей СИ. Отсюда следует вывод, что измерять отклонения поля следует с заведомо меньшей

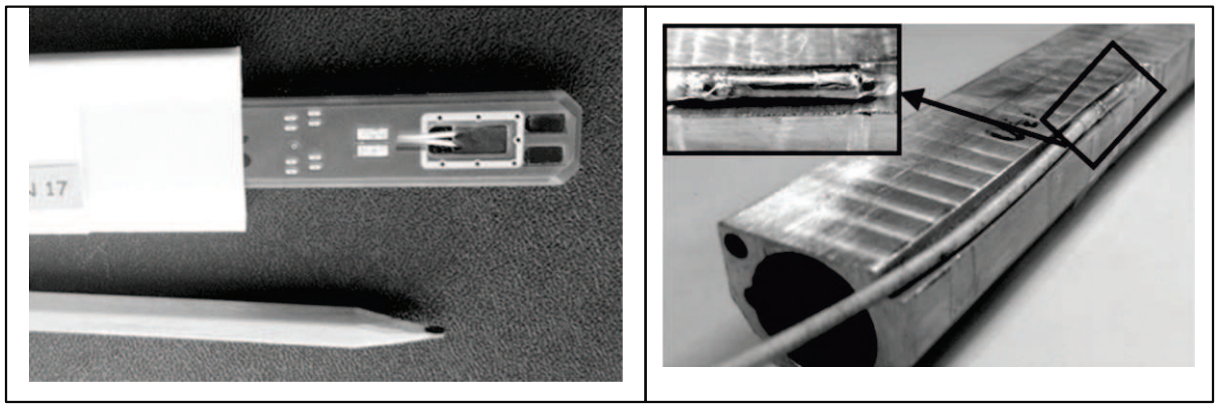


Рис. 4. Слева — плата с датчиками Холла в пенале. Справа — ЯМР датчик с сигнальным кабелем в вакуумной камере.

ошибкой. За ошибку измерения вариаций поля было принято значение 2–3 G в диапазоне измеряемых полей 2.5 T. Эти требования в основном касаются холловского измерителя, так как ЯМР-магнетометр заведомо обеспечит требования и по точности и по диапазону.

К этим основным параметрам системы мониторинга следует добавить еще ряд требований, перечисленных далее. Количество измерительных устройств (точек измерения), распределенных по кольцу накопителя, должно быть 16 шт. — по количеству ВРС диполей. Темп опроса каждого устройства — один раз за 1–3 s. Кроме того, система мониторинга должна быть интегрирована в общую систему управления установкой для реализации функций коррекции орбиты. Желательно, чтобы система мониторинга обеспечивала так называемые „холодные“ режимы работы для процедур настройки и инжекции и „теплые“, стационарные режимы для проведения экспериментов с СИ.

В дополнение к перечисленному отметим, что рабочий диапазон температур расположенных в магните датчиков — от +17 °C (температура дистиллята — 19 °C) до 35 °C. Рабочий диапазон температур электроники — (23 ± 1) °C.

В завершение настоящего раздела кратко остановимся на проблемах надежности разрабатываемой системы мониторинга при работе в радиационной обстановке. У авторов нет ясного понимания, как будет вести себя рабочее вещество ЯМР-датчика (резина), а также датчики Холла в случае возможного воздействия радиации.

Различные оценки дают основания предполагать, что при обычной работе на потребителей СИ в местах установки обоих датчиков уровень радиации будет незначителен, однако в случае попадания пучка на стенку камеры вблизи ВРС-диполя, что вероятно при отладочных работах и запуске накопителя, радиационное воздействие возможно. Наличие дублирующих измерителей — ЯМР и двух датчиков Холла — позволит определить радиационную деградацию или иные неисправности, сравнивая получаемые данные. Окончательный ответ о надежности работы датчиков может дать лишь эксплуатация системы мониторинга.

1.2. Расположение датчиков и погрешности измеряемых полей относительно полей на орбите

В реальных ВРС-диполях вакуумная камера усложняет установку датчиков, что приводит к погрешности измеряемых полей относительно поля на орбите. Плата с двумя датчиками Холла (рис. 4) располагается снаружи вакуумной камеры в медианной плоскости как схематично показано на рис. 5. Для установки датчиков в медианную плоскость магнита используется напечатанный на 3*D*-принтере пластиковый корпус-пенал. Пенал устанавливается внутри магнита с опорой на полюс в вертикальном направлении и на крепления магнитов в поперечном. Плата с датчиками Холла вставляется в пенал после сборки половинок магнита и может заменяться. Расположение пенала с датчиками можно увидеть на левой фотографии на рис. 1 и схематично — на рис. 5. Датчики отстоят от центра магнита на 23 mm в поперечном направлении и на 2.5 mm в продольном направлении в обе стороны.

ЯМР-датчик располагается в верхнем внутреннем углу вакуумной камеры почти над датчиком Холла. Его центр расположен в 18 mm от центра камеры в поперечном направлении и по высоте. Длина датчика ЯМР в экране — 20 mm, диаметр — 4 mm.

Как видно из правого графика на рис. 5, продольная однородность составляет 0.4 G/cm, что достаточно для уверенной работы ЯМР. Гораздо хуже ситуация с поперечной неоднородностью, как видно из графика на рис. 5 слева. Поперечная неоднородность в зоне установки датчика близка к предельному значению 2 G/mm на размере датчика.

Покажем, каково отличие в величинах измеряемых полей в зонах установки датчиков относительно центра вакуумной камеры. Обратимся к графику слева на рис. 5, где показаны результаты моделирования поперечно-

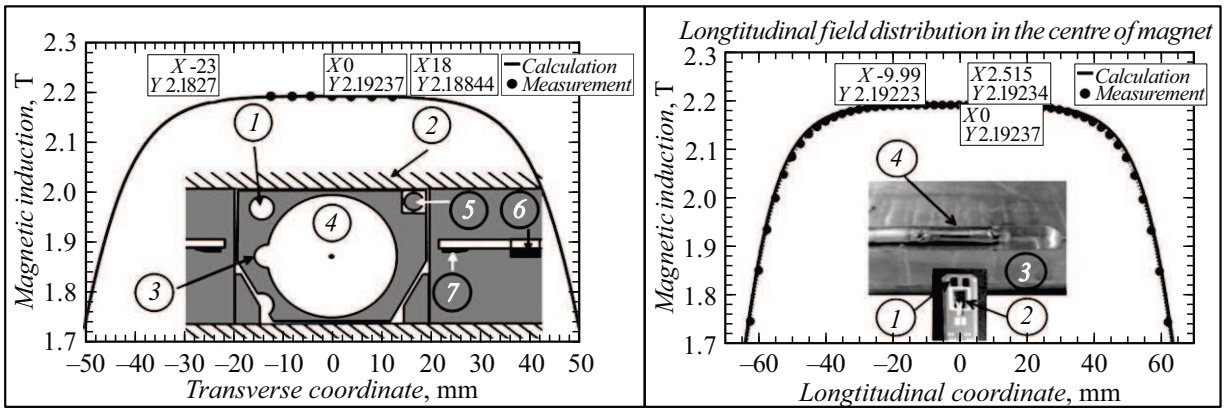


Рис. 5. Слева — эскиз поперечного сечения магнита и график распределения поля по радиусу: *1* — водяной канал системы охлаждения, *2* — полюс магнита, *3* — место нагрева от СИ, *4* — пучок электронов, *5* — датчик ЯМР, *6* — датчик температуры, *7* — датчик Холла. Справа — относительное расположение датчиков ЯМР и Холла для вида сверху и продольное распределение поля: *1* — датчик Холла, *2* — датчик температуры, *3* — вакуумная камера, *4* — датчик ЯМР.



NMR *sensor* *Preamlifier* *Electronic module*

Рис. 6. Структура ЯМР-магнетометра.

го распределения поля, а также расчетные значения полей в точках $X = 0$ (центр камеры $B = 2.1923$ T), $X = +18$ mm (датчик ЯМР, $B = 2.1884$ T) и $X \approx 23$ mm (датчик Холла, $B = 2.1827$ T). Отличие магнитного поля в центре орбиты и датчиков ЯМР и Холла согласно расчетам — 39 и 96 G.

Разницу между данными ЯМР-магнетометра и холловского измерителя можно использовать для оценочной калибровки и достоверности показаний датчиков Холла. Кроме того, можно привязать угол поворота магнита, опираясь на магнитные измерения и учитывая приведенные выше отличия в поле на орбите и измеренные поля.

2. Измерительная аппаратура

2.1. Импульсный ЯМР-магнитометр

Работа ЯМР-магнетометра, предназначенного для работы в ВРС-диполях, базируется на импульсной методике, применяемой в ИЯФ СО РАН в течение многих лет. Методика заключается в воздействии на образец, расположенный в датчике, радиочастотным импульсом и последующей регистрацией отклика на этот импульс [5].

На рис. 6 показана структура магнетометра. Она включает ЯМР-датчик и электронику, состоящую из малошумящего предусилителя, расположенного рядом с датчиком и соединенного с ним коаксиальным 50-омным кабелем длиной около 1 m и основного блока электроники, находящегося в стойке в защищенном зале. Детальное описание импульсного ЯМР-магнетометра можно найти в [5].

Длительность сигнала ЯМР, а соответственно, и отношение сигнала к шуму в частотной области обратно пропорциональны неоднородности магнитного поля ΔB в объеме рабочего материала датчика. Точность измерений поля при этом падает с ростом ΔB, как $\Delta B^{3/2}$. С ростом ΔB, начиная с некоторых значений, ЯМР магнитометр вообще перестает измерять магнитное поле.

Достаточно большой градиент поля — более 20 G/cm является главной проблемой при измерении магнитных полей при помощи ЯМР-метода. Для того чтобы уменьшить величину ΔB, в датчике ЯМР для ВРС диполя, использован очень малый объем рабочего материала — около 1 mm^3. В качестве материала в этом датчике использован кубик из резины размером 1×1 mm. Кубик помещен в стеклянную трубку, на которую намотана катушка, применяемая и для возбуждения ядер рабочего вещества, и для съема сигналов отклика. Трубка помещена внутрь ПХВ трубки, которая покрывается тонкой медной фольгой для экранировки корпуса датчика от помех (рис. 4). Внешний диаметр датчика не превышает 4 mm.

Несмотря на малый объем рабочего вещества, за счет значения измеряемого поля около 2 T сигнал ЯМР достаточен для достижения вполне удовлетворительной

Таблица 2. Параметры датчиков Холла HE 244

Параметр	Значение тип.
Рабочий ток	2 mA
Чувствительность @ $I = 2$ mA	$20\,\mu$V/G
Температурный коэффициент чувствительности @ $I = 2$ mA при индукции магнитного поля $B = 2.1$ G	-1.5 G/°C
Нелинейность @ $I = 2$ mA, $B = (\pm1)-(\pm2.4)$ T	$\leq \pm0.2$ %
Сопротивление со стороны токовых выводов	500 Ω
Сопротивление со стороны холловских выводов	500 Ω
Частотный диапазон	≥ 200 kHz

точности измерений на уровне $3 \cdot 10^{-5}$. Ширина спектра сигнала ЯМР получается менее 10 kHz, что при накоплении сигнала в течение нескольких секунд и обеспечивает такое значение точности.

По завершению разработки в накопителе „СКИФ“ будет развернуто 16 однотипных ЯМР магнетометров, измеряющих поля во всех ВРС диполях.

2.2. Подсистема с датчиками Холла

Описание подсистемы с датчиками Холла начнем с характеристик применяемых датчиков. В настоящей работе применяются планарные датчики HE 244 [7]. Их основные параметры приведены в табл. 2. Чувствительный элемент запрессован в пластиковый корпус и имеет точно определенное положение относительно корпуса.

У применяемых датчиков есть два преимущества. Первое — вполне удовлетворительная чувствительность при небольшом рабочем токе и сравнительно малом выходном сопротивлении, что упрощает электронику. Второе — очень малая температурная зависимость смещения нуля. Измерения нескольких десятков датчиков из полученной партии продемонстрировали величину смещения нуля не более ±7 G, а температурный дрейф — не более $\pm3 \cdot 10^{-2}$ G в диапазоне температур $(+17)-(+30)$ °C. Это обстоятельство дает возможность учесть смещение при первичной калибровке, а далее считать константой.

Вместе с тем отметим достаточно большой температурный коэффициент чувствительности, типовое значение которого — 1.5 G/°C. В рабочем диапазоне температур такой дрейф приводит к ошибке 30 G, что на порядок больше заданной проектной величины ±2 G. Для устранения этой проблемы необходимо измерить температурные зависимости для каждого датчика персонально и далее учитывать эти зависимости при вычислении поля из измеренного напряжения датчика.

Определение реальных значений чувствительности и ее температурной зависимости проводилось на стенде, состоящем из калибровочного магнита с перестраиваемым и однородным полем, ЯМР-магнетометра и термостата, куда устанавливалась сборка из десяти датчиков Холла и датчик температуры, механически объединенных на медной подложке. Зона неоднородности с величиной 2.5 G имеет размер 3×3 cm при поле 2.2 T, что позволило установить датчик магнетометра рядом с холловской сборкой. Для калибровки применялась электроника и программное обеспечение, описанные в [8].

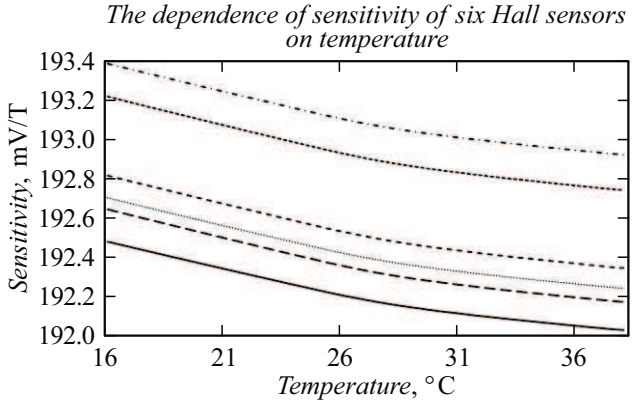


Рис. 7. Зависимость чувствительности шести датчиков HE244 от температуры при поле 2.1 T.

Процедура калибровки состояла из двух этапов. На первом в калибровочном магните устанавливалось нужное поле, измерявшееся магнетометром. На втором — при установившемся поле изменялась температура термостата и снималась зависимость холловского напряжения от температуры. Далее такая процедура повторялась для пяти значений полей в диапазоне 1.8–2.2 T. Измеренные зависимости чувствительности от температуры показаны на рис. 7.

Измерения продемонстрировали еще одно полезное свойство применяемых датчиков: практически одинаковую зависимость от температуры для всех датчиков в партии. Это свойство облегчит вычисление величин

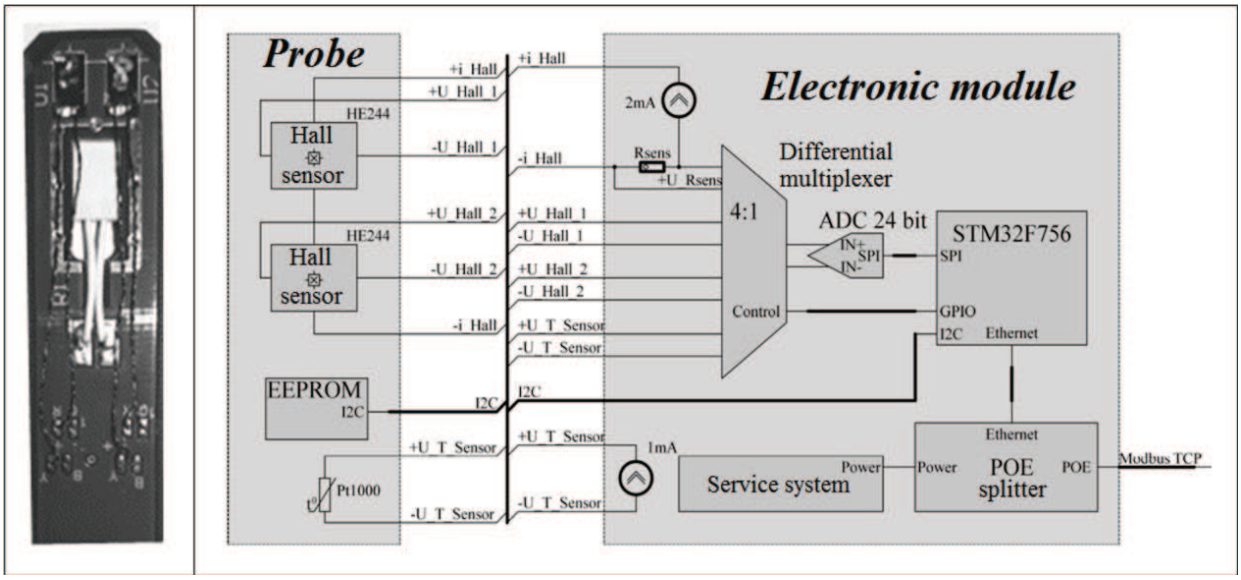


Рис. 8. Слева — плата с датчиками. Справа — структурная схема электронного блока.

полей из измеренных напряжений, так как даст возможность использовать единое аналитическое выражение температурной зависимости чувствительности для всех шестнадцати устройств системы мониторинга.

На рис. 8 показана структура одного из 16 измерителей поля с датчиками Холла. В его состав входят: плата с двумя датчиками и датчиком температуры Pt 1000, сигнальная коса с разъемом, подключаемым к электронному блоку и собственно сам блок.

В разъеме сигнальной косы размещена микросхема памяти (EEPROM), в которую записываются таблицы калибровок датчиков, размещенных на плате, откуда выводится сигнальная коса. Такое решение в случае замены плат с датчиками позволяет загрузить в электронный блок соответствующую калибровку.

Блок электроники обеспечивает измерение холловских напряжений от двух датчиков, а также их рабочего тока и напряжения на датчике температуры. В структуру электроники входит $\Sigma\Delta$ АЦП с разрядностью 24 бита и четырьмя дифференциальными входами, генератор стабильного тока 2 mA, питающий датчики Холла, генератор тока 1 mA для терморезистора Pt 1000, а также узел управления блока и связи с системой управления накопителя. Последний выполнен на процессоре STM32F756. Взаимодействие с системой управления реализуется через линию POE, с помощью которой также заводится питание в блок электроники.

3. Результаты тестирования опытной версии системы мониторинга

Для тестирования прототипов обеих подсистем мониторинга был собран стенд, включающий ВРС-диполь, ЯМР-магнетометр и измеритель с датчиком Холла.

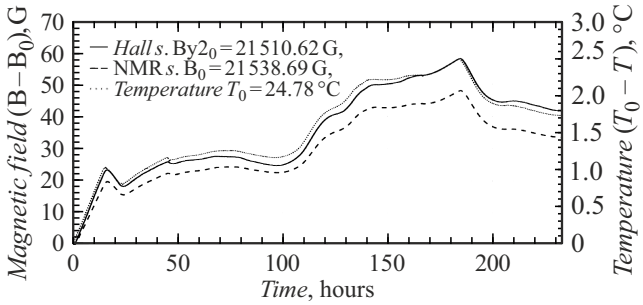


Рис. 9. Долговременные измерения поля в ВРС диполе ЯМР магнетометром и холловской подсистемой.

В ВРС-диполе вакуумная камера отсутствовала, поэтому ЯМР датчик устанавливался там, где должен быть центр камеры. Плата с датчиком Холла и термодатчиком устанавливалась на своем штатном месте, как описано в разд. 1.2.

Тестирование заключалось в измерении поля магнита обеими подсистемами в течение 250 h и одновременного измерения температуры. Далее были построены графики изменения во времени магнитного поля и температуры, начиная со значений B0 и T0. Начальное поле B0, измеренное ЯМР-магнетометром, когда датчик был установлен в центре магнита, равнялось 21538.69 G, начальное поле холловского измерителя с датчиком в штатной позиции — 21510.62 G. Начальное значение температуры — 24.8 °C.

Полученные зависимости представлены на рис. 9.

Как видно из графиков, отличие измеренных значений датчиков ЯМР и Холла за 250 h — не более 2 G. Выполненное тестирование дает основание для начала разработки рабочих версий подсистем.

Заключение

Для измерения и последующей коррекции поля в ВРС диполях основного кольца комплекса СКИФ предложены дублирующие друг друга подсистемы. Одна базируется на ЯМР-магнетометре, другая — на измерителях с датчиками Холла. Подготовлены прототипы подсистем, с помощью которых на стенде магнитных измерений проведено их тестирование с реальным диполем. Тестирование продемонстрировало совпадение результатов обеих подсистем с погрешностью ± 2 G.

В настоящее время в диполях установлены пеналы для датчиков Холла, подготовлены вакуумные камеры с проточкой для ЯМР-датчиков, разрабатываются рабочие версии электроники.

К настоящему времени разработаны и испытаны опытные образцы двух подсистем долговременного мониторинга поля в диполях, дублирующие друг друга. Одна использует ЯМР-метод, другая — измерения с датчиками Холла. Начата разработка рабочих версий подсистем.

Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить сотрудников ИЯФ Г. Баранова и Г. Гусева за предоставленные результаты по тепловым расчетам и динамике пучка, а также продуктивные консультации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Т.В. Рыбицкая. *Гибридный диполь на 2 T с постоянными магнитами и катушкой.* Доклад на конференции Magnetech 25.09.24 тайминг 9:15:00 [Электронный ресурс]. URL: https://magnetconf.ru/online (дата обращения: 08.09.2025)
[2] Г.А. Гусев. Частное сообщение.
[3] ANSYS CFX [Электронный ресурс] URL: https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/fluids/cfx (дата обращения: 08.09.2025)
[4] Г.Н. Баранов, П.А. Дергач, К.Ю. Карюкина, В.А. Павлюченко, Е.Б. Левичев. ЖТФ, **93** (11), 1653 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.11.56498.153-23
[5] Г.В. Карпов. Автометрия, **51** (1), 70 (2015).
[6] А.Ю. Пахомов. Частное сообщение.
[7] *Datasheet for Hall sensor.* https://asensor.eu/oneweb-media/ Datasheet-HE244X.pdf
[8] A. Batrakov, S. Zverev, I. Ilyin, V. Kozak, E. Kuper, V. Mamkin, V. Ovchar, G. Fatkin, V. Tsukanov, P. Vobly, A. Volkov. *The New VME Based System for Magnetic Measurements with Hall Sensors* (Proceedings of RuPAC, 2006, Novosibirsk, Russia), https://proceedings.jacow.org/r06/PAPERS/THDO07.pdf