

P9-2011-49

А. В. Калмыков, С. И. Кукарников, В. М. Лачинов,
В. К. Маковеев, В. К. Сподарец, А. П. Сумбаев

**СТЕНД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ
МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ
ФОКУСИРОВКИ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА
УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200 УСТАНОВКИ ИРЕН**

Калмыков А. В. и др.

P9-2011-49

Стенд для моделирования и испытания магнитных элементов системы фокусировки и транспортировки пучка ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН

Приводятся технические параметры и физические возможности стенда, предназначенного для моделирования и испытания дипольных электромагнитов, используемых в системе фокусировки и транспортировки пучка линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200. Представлены общая схема стенда, описание магнитометра и устройства позиционирования датчиков Холла. Написано программное обеспечение стенда.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2011

Kalmykov A. V. et al.

P9-2011-49

A Stand for Simulation and Test of the Magnetic Components of the Focus Beam and Transport Systems for Accelerator LUE-200, Installation IREN

Technical parameters and physical abilities of the equipment stand for simulation and testing of the dipole electromagnet to focus and transport the beam of the linear accelerator (LUE-200) are described. The overall design of the stand, a description of the magnetometer and the positioning system of Hall sensors are presented. The software of the stand has been developed.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Концептуальным проектом линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200 для нового импульсного источника нейтронов ИРЕН Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ [1, 2] в системе фокусировки пучка предусмотрено использование соленоидальных дипольных электромагнитов, устанавливаемых в начальной части ускорителя (электронная пушка + первая ускоряющая секция), и квадрупольных линз, устанавливаемых по длине второй ускоряющей секции и в канале транспортировки пучка от ускорителя до мишени. И в том и в другом случае система фокусировки базируется на электромагнитах, диаметр внутренней апертуры которых D_{in} превышает наружный диаметр ускоряющих секций $D_{AS} = 160$ мм.

В процессе разработки и изготовления электромагнитов системы фокусировки возникла необходимость создания специализированного магнитометрического стенда, предназначенного для моделирования аксиально-симметричных дипольных электромагнитов, испытания и паспортизации изготовленных крупногабаритных соленоидальных магнитов (внутренний диаметр $D_{in} = 258$ мм, внешний диаметр $D_{out} = 530$ мм, длина $L = 144, 310, \dots, 2600$ мм), а также для отработки методики измерения магнитных полей и тестирования электромагнитов на штатных местах в режимах, близких к штатным режимам работы на ускорителе. Первоначальным вариантом соленоидального канала системы фокусировки [1] было предусмотрено использование соленоидов с величиной продольного магнитного поля до 4 кГс с относительно высокой однородностью, определяемой соотношением радиальной и аксиальной компонент магнитного поля в приосевой области: $\delta = B_r/B_z \sim 10^{-3}$. Следовательно, магнитометрическая аппаратура стенда должна обеспечивать измерение (азимутальных, аксиальных и радиальных распределений) как сильных магнитных полей с индукцией до 4–5 кГс, так и слабых радиальных составляющих индукции магнитного поля на уровне 0–5 Гс в геометрической области, занимаемой пучком электронов, с размерами $R_b < 10$ мм на длине до 350 см с точностью позиционирования не хуже величины, определяемой соотношением $\delta \cdot D$, где D — характерный размер катушки соленоида, т. е. $< 0,2$ мм. Естественно, что и размеры сенсорных преобразователей для обеспечения подобного пространственного разрешения должны быть соизмеримыми, т. е. < 1 мм.

СОСТАВ СТЕНДА

В состав стенда входит комплекс аппаратуры, включающий:

- ступень для установки исследуемых магнитов;
- трехканальный холловский магнитометр с пробником;
- эталонный электромагнит;
- устройство позиционирования пробника с датчиками Холла;
- управляющий компьютер;
- сильноточные источники питания.

Блок-схема стенда представлена на рис. 1. Исследуемые электромагниты (одна или две соленоидальные катушки с размерами обмоток $\approx \varnothing 524 / \varnothing 258$ мм, $L = 144$ мм) устанавливаются в жестком ступе, обеспечивающем юстировку (регулировку положения) катушек относительно центральной продольной оси устройства позиционирования. Электромеханическое устройство позиционирования обеспечивает перемещение магнитометрического пробника в продольном, радиальном и азимутальном направлениях.

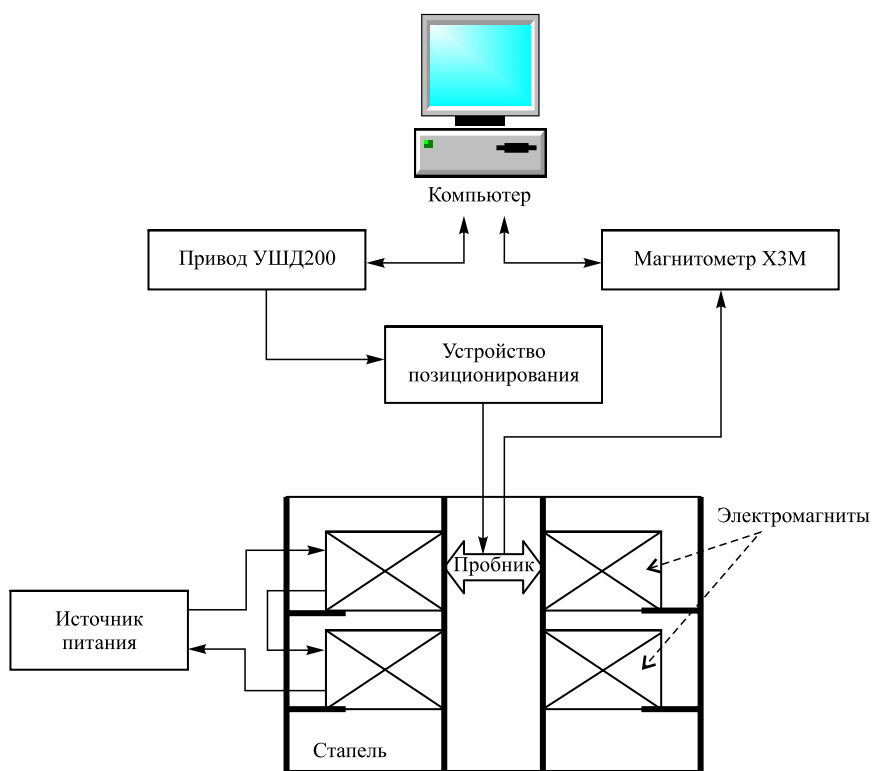


Рис. 1. Блок-схема магнитометрического стенда

Магнитное поле измеряется холловским магнитометром ХЗМ. Стенд управляется персональным компьютером (ПК) IBM PC, на котором также представляются результаты измерений. В качестве источников питания катушек соленоида используются высокоточные стабилизированные источники фирмы «Bruker» (280 В, 500 А).

МАГНИТОМЕТР ХЗМ

Разработанный ранее трехканальный холловский магнитометр ХЗМ [3] предназначен для измерения постоянных или медленно меняющихся магнитных полей. Блок-схема магнитометра представлена на рис. 2. В комплекте имеются три независимые измерительные канала с идентичными преобразователями — датчиками Холла (ДХ1, ДХ2, ДХ3). В приборе использованы высокостабильные датчики Холла, прецизионные операционные усилители типа КР140УД17А с автоматической коррекцией нуля. Для увеличения чувствительности в магнитометре используется питание датчиков Холла импульсным током с амплитудой 1 А, превышающей номинальное значение тока питания в 10 раз, и длительностью 0,5 мс. Предусилители и датчики Холла термостабилизированы. Система термостатики поддерживает постоянную температуру в усилителях, равную 35 °С, в преобразователях Холла — 25 °С с колебаниями температуры в них не более 0,1 °С. В качестве оконечного измерителя используются стробируемые аналого-цифровые преобразователи типа АЦП 12/16 (12 разрядов, 16 входов) [4]. Момент измерения определяется импульсом — стробом, который вырабатывается синхронизатором и жестко «привязан» к импульсу тока питания датчиков Холла. Блоки электроники магнитометра изготовлены и работают в стандарте САМАС.

Процесс измерения инициализируется от компьютера через собственный синхронизатор магнитометра МС-3. Команда «старт» готовит систему к работе и после появления синхроимпульса формирует импульс запуска измерения. Этот импульс переводит схему автоматической коррекции нуля в режим хранения, а затем вырабатываются в связке импульсы тока питания датчиков Холла и импульсы стробирования АЦП. После измерения схема с автоматической коррекцией нуля переводится в режим выборки, а магнитометр выставляет на САМАС-магистраль L, что означает готовность к следующему циклу измерения. Выборка результата происходит за 0,5 мс, а фиксация результата происходит за 0,2 мкс, т. е. результат фиксируется через 0,5 мс после подачи импульса синхронизации с интегрированием результата в течение 0,2 мкс. Результаты измерений в виде показаний АЦП передаются в ПК и накапливаются в массивах, сформированных программным обеспечением в соответствии с решаемыми задачами.

Магнитометр может быть использован как с любым каналом по отдельности, так и в комбинации из любых двух или из трех синхронно работающих

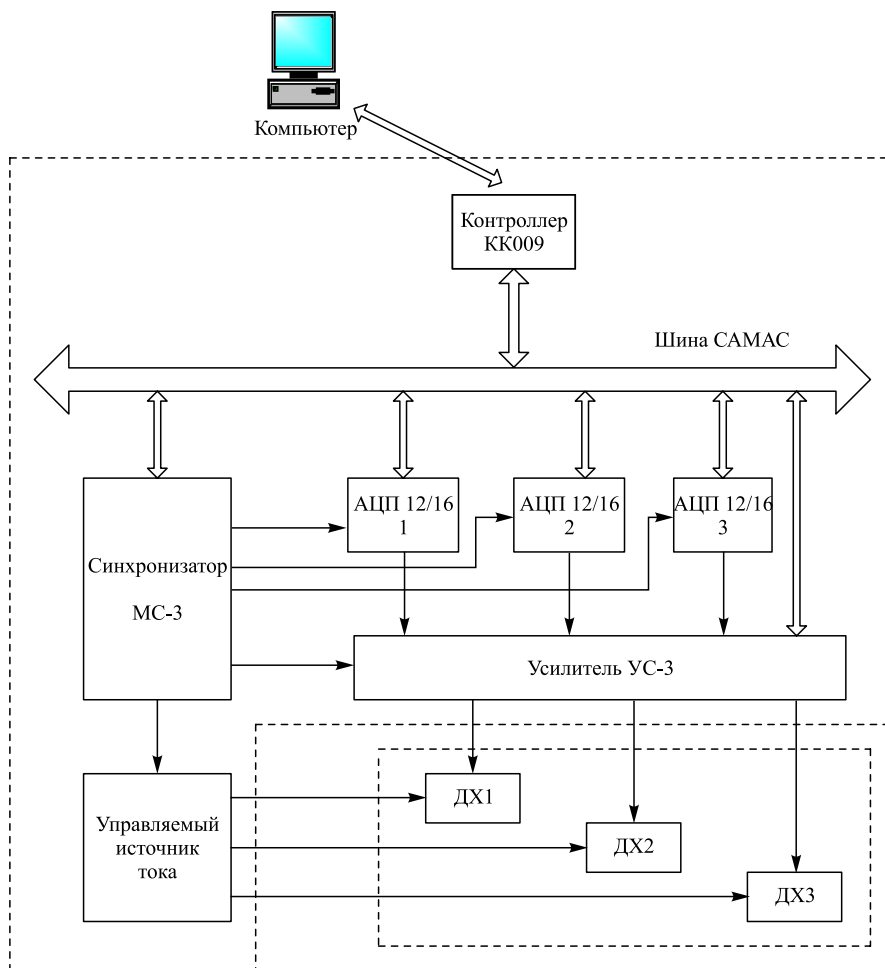


Рис. 2. Блок-схема магнитометра ХЗМ

каналов. При использовании двух измерительных каналов магнитометр работает, как правило, с тремя регистрационными каналами на трех соответствующих АЦП. Режим с регистрацией на трех АЦП снижает влияние сигналов различных каналов друг на друга, что особенно важно при измерении слабых полей.

Специфической особенностью холловских магнитометров является гальваномагнитная нечетность эффекта Холла, требующая принятия специальных мер при измерении пространственных распределений знакопеременных маг-

нитных полей, изменяющих направление (или знак) на противоположное. В таких случаях необходимо изменять направление тока питания датчика Холла, либо поворачивать датчик Холла чувствительной плоскостью на 180°.

ПАРАМЕТРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА МАГНИТОМЕТРА

С целью адаптации магнитометра ХЗМ к новым задачам в приборе использованы высокостабильные преобразователи — датчики Холла типа ПХЭ 605-118, основные параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры преобразователей Холла магнитометра

Размеры преобразователя, мм	2×2×0,8
Размеры рабочей зоны, мм	0,75×0,25
Номинальный управляющий ток, мА	100
Остаточное напряжение, мкВ	3
Магнитная чувствительность, мкВ/мГс	5,9
Температурный коэффициент ЭДС Холла	0,004
Температурный коэффициент остаточного напряжения	0,03
Интервал рабочих температур, К	1,5–373
Верхний предел индукции магнитного поля, кГс	150

Отличительной особенностью используемых преобразователей являются малые размеры рабочей зоны (< 1 мм), существенно меньшие поперечных размеров области сканирования магнитных полей, что улучшает пространственное разрешение прибора, и высокая магнитная чувствительность, позволяющая использовать одни и те же преобразователи в широком диапазоне полей.

КАЛИБРОВКА ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

Датчики Холла магнитометра калибруются в высокооднородном магнитном поле межполюсного зазора эталонного электромагнита [5] с помощью ЯМР-магнитометра РТ 2025 METROLAB (максимальные измеряемые поля до 50 кГс), который дает абсолютную точность 0,001%. Кроме того, применение нутационной методики позволяет прокалибровать датчики в полях с индукцией ниже 300 Гс. Испытания показали, что прибор имеет чувствительность не хуже ±0,1 Гс, а относительную точность не хуже ±0,05%. Результаты калибровки в разных диапазонах магнитного поля представлены в табл. 2. Показания магнитометра записываются как $B = KN$, где K — ширина канала, N — показание АЦП в каналах.

Калибровочные таблицы включены в программное обеспечение магнитометра и используются для представления результатов измерений магнитной индукции в гауссах.

Таблица 2. Результаты калибровки датчиков Холла в разных диапазонах магнитного поля

Канал	Диапазон	K , Гс/канал	B_{\min} , Гс	B_{\max} , Гс
ДХ1	Сильные поля	1,33	0	5375,70
	Средние поля	0,75	0	3078,80
	Слабые поля	0,040	0	162,63
ДХ2	Сильные поля	1,22	-12,15	5002,91
	Средние поля	0,70	-7,12	2867,02
	Слабые поля	0,039	-7,12	151,16
ДХ3	Сильные поля	2,26	0	9262,03
	Средние поля	1,30	0	5311,40
	Слабые поля	0,068	0	279,24

Для регистрации радиальной составляющей магнитного поля B_r используется, как правило, датчик ДХ2, измерительный диапазон которого расширен в области средних и слабых полей в сторону отрицательных значений поля до $-7,12$ Гс. Для измерения отрицательных магнитных полей с индукцией более $7,12$ Гс ток в обмотках исследуемых катушек изменялся на противоположный, формируя тем самым эквивалентное первоначальному, но противоположно направленное магнитное поле, значение которого и регистрировалось.

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРОБНИК

Измерения магнитных полей в исследуемых катушках фокусирующего соленоида предполагают независимые измерения двух компонент магнитного поля — аксиальной B_z и радиальной B_r в синхронном режиме. Для этой цели в конструкции магнитометрического пробника предусмотрена совместная установка двух преобразователей — датчиков Холла, ориентация чувствительных плоскостей которых ортогональна соответствующим компонентам поля (рис. 3). Пробник представляет собой комбинацию двух датчиков Холла ПХЭ 605-118, помещенных в общую кассету размерами $45 \times 45 \times 25$ мм. При этом датчик для измерения B_z (аксиальной) компоненты ДХ1 устанавливается в кассете фиксированно, а датчик для измерения B_r (радиальной) компоненты ДХ2 может перемещаться в плоскости кассеты в поперечном направлении (в цилиндрической системе координат — по радиусу).

Третий измерительный канал сохранялся в качестве резервного или использовался в измерениях в качестве нормировочного показателя.

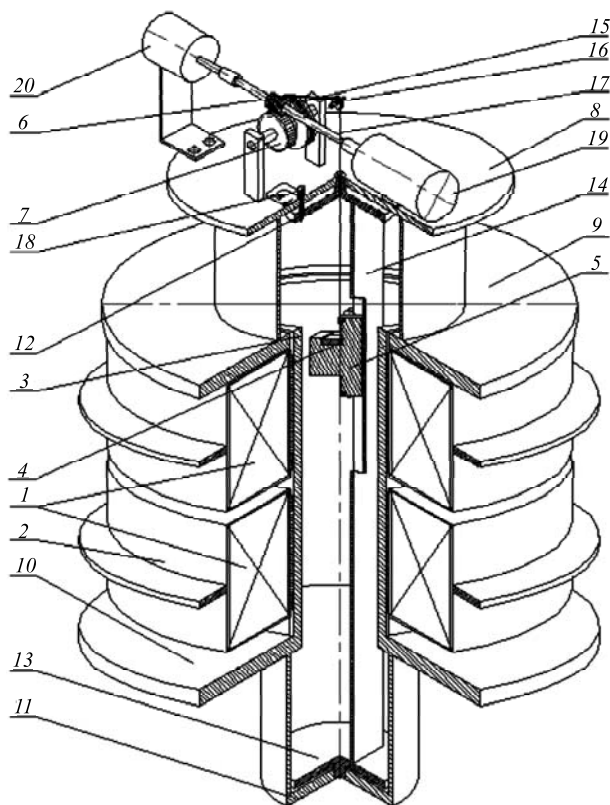


Рис. 3. Схема конструкции внутренней части стапеля с устройством позиционирования пробника: 1 — испытуемые катушки; 2 — внешние экраны катушек — магнитопроводы; 3 — центральная несущая труба; 4 — кассета с пробником (датчиками Холла); 5 — каретка с кассетой пробника; 6, 7 — червячная пара (6 — червячный вал, 7 — червячное колесо); 8 — столик; 9 — верхний торцевой фланец; 10 — нижний торцевой фланец (торцевой экран соленоида); 11 — опорный фланец направляющего швеллера; 12 — диск верхний; 13 — диск нижний; 14 — направляющий швеллер; 15 — барабан с тросиком; 16 — ролик; 17 — тросик; 18 — фиксатор углового вращения; 19 — шаговый двигатель ШДИ-200; 20 — счетчик оборотов

СТАПЕЛЬ И УСТРОЙСТВО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Устройство стапеля и системы позиционирования пробника представлены на рис. 1, 3, 4. Общий вид стенда со стапелем и системой позиционирования приведен на рис. 4.

Конструкция стапеля и его функциональное назначение отчасти повторяют конструкцию и функциональное назначение несущей фермы фокуси-



Рис. 4. Общий вид испытательного магнитометрического стенда

рующего соленоида первой ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200. Станция представляет собой подобие вертикально ориентированной «этажерки», смонтированной на четырех угловых жестко связанных швеллерах (рис. 3, 4).

Внизу «этажерки» устанавливается нижний торцевой экран соленоида — массивный фланец, в котором в вертикальном положении закрепляется толстостенная центральная несущая труба 3, изготовленная из нержавеющей стали, предназначенная для размещения и центрирования испытуемых электромагнитов. Исследуемые электромагниты — одна или две катушки соленоида 1 при установке в станцию «накладываются» на эту трубу, обеспечивающую центровку и соосность катушек относительно продольной оси трубы. Для обеспечения возможности моделирования и формирования полей аксиально-симметричных электромагнитов конструкция каркасов катушек позволяет изменять наклон осей катушек относительно геометрической оси z (оси несущей трубы), вдоль которой производится измерение аксиальной составляющей магнитного поля, на угол ± 10 мрад. Расстояние между торцевым фланцем, нижней катушкой и между катушками может изменяться с помощью регулировочных винтов, закрепленных на корпусах катушек. Этими же винтами регулируется угол отклонения оси катушек от оси трубы (оси z — оси вращения системы).

Устройство позиционирования пробника магнитометра устанавливается и закрепляется на торцах несущей трубы с помощью столика 8, на котором расположена червячная пара 6,7 с барабаном 15, а также шаговый двигатель ШДИ-200 19 и счетчик оборотов 20. На барабан 15, жестко связанный с червячным колесом 7, намотан тросик 17, который другим концом, перекинутым через ролик 16, прикреплен к каретке 5. На каретке установлен пробник — кассета 4 с датчиками Холла ДХ1 и ДХ2.

Принципиальная схема устройства позиционирования представлена на рис. 5. Система обеспечивает перемещение пробника с датчиками Холла в продольном, радиальном и азимутальном направлениях, обеспечивая тем самым возможность измерения распределений компонент магнитного поля по трем независимым координатам цилиндрической системы координат: z , r и φ .

Перемещение пробника с преобразователями вдоль оси z (вверх-вниз) осуществляется с помощью каретки 5, двигающейся по направляющему швеллеру 14, который располагается вертикально внутри несущей трубы (внутри катушек). Управление движением каретки вверх-вниз осуществляется дистанционно. Перемещение каретки вверх (режим измерений) обеспечивается натяжением тросика, намотанного на барабан, который через червячную пару

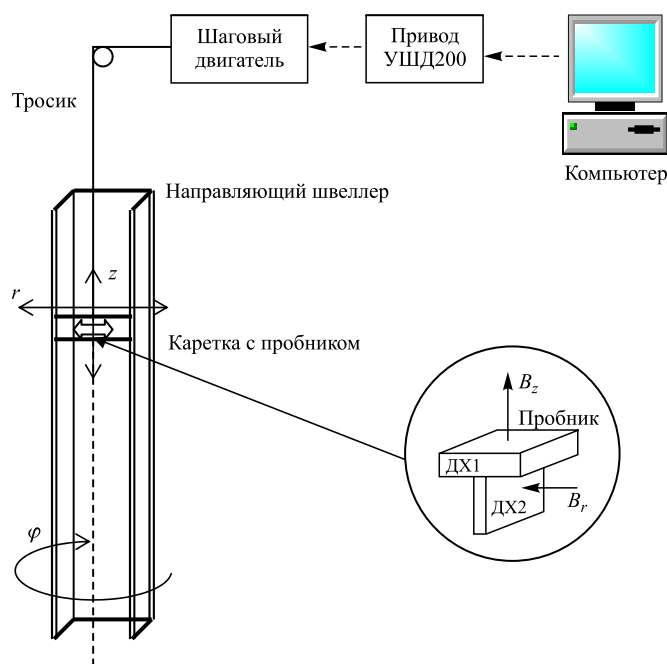


Рис. 5. Принципиальная схема системы позиционирования пробника

вращается шаговым двигателем ШДИ-200. Перемещение каретки вниз (холостой ход) обеспечивается собственным весом каретки при вращении двигателя в обратную сторону. Для ограничения продольного движения каретки на концах направляющего швеллера установлены концевые выключатели, отключающие подачу питания в двигатель при срабатывании. Расстояние между выключателями на швеллере для измерения полей двух катушек $L = 484$ мм, что позволяет производить измерения магнитного поля внутри катушек и краевых полей катушек за пределами их фланцев на расстоянии до 60 мм от каждого торца.

Направляющий швеллерверху 12 и внизу 13 крепится к дискам, которые могут поворачиваться вокруг оси z на 360° с дискретно фиксированным шагом 10° . Угол поворота задается фиксатором 18. Поворот пробника с преобразователями по азимуту осуществляется вручную по месту вращением дисков со швеллером на заданный угол.

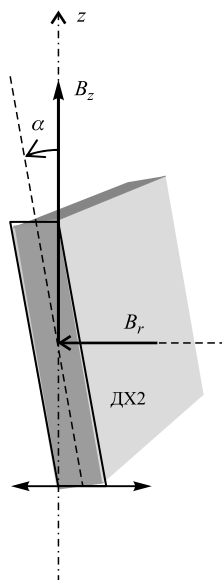


Рис. 6. Схема юстировки датчика Холла ДХ2

будет определяться как αB_z , где α — угол между чувствительной плоскостью датчика и осью z (рис. 6). Величина осевой компоненты магнитного поля в исследуемых катушках составляет ≈ 2000 Гс, следовательно, при угловом отклонении плоскости датчика от оси z , например, на 10 мрад вклад осевой компоненты в показание датчика будет составлять величину около 20 Гс.

Радиальное перемещение преобразователя ДХ2 (изменение координаты r без изменения его углового положения относительно оси) производится вручную винтом, установленным на боковой поверхности кассеты пробника. Датчик аксиальной компоненты поля ДХ1 при этом не меняет своего положения. Механизм перемещения датчика ДХ2 позволяет варьировать его радиальное положение относительно оси в диапазоне значений радиуса от $r = -2$ мм до $r = +14$ мм.

Все детали устройства позиционирования изготовлены из немагнитных материалов.

Показания датчика ДХ2, регистрирующего радиальную составляющую магнитного поля, существенно зависят от точности установки чувствительной плоскости датчика. Это связано с тем, что датчик, имеющий угловое отклонение от заданной оси, помимо радиальной компоненты магнитного поля B_r регистрирует и суммирует и осевую составляющую B_z . Величина регистрируемой осевой составляющей поля при малом отклонении

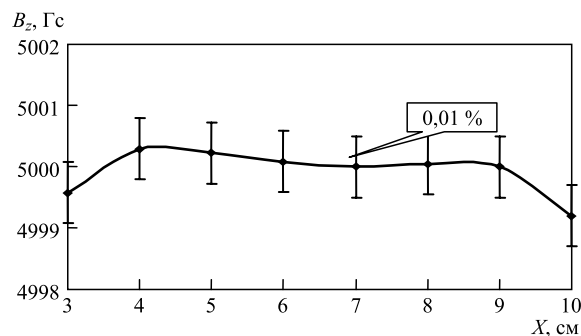


Рис. 7. Распределение магнитного поля B_z в зазоре эталонного магнита

Для минимизации вклада B_z в измеряемое значение радиальной составляющей перед началом измерений проводится юстировка положения датчиков внутри кассеты магнитометрического пробника. Кассета помещается в поле эталонного магнита [5] в область максимально однородного поля (рис. 7), где посредством регулировки положения датчика ДХ2 достигается минимальное значение показаний, соответствующих измеряемой поперечной составляющей магнитного поля. Это означает, что чувствительная плоскость ДХ2 устанавливается параллельно силовым линиям магнитного поля.

ПРИВОД УШД200

Исполнительным элементом системы перемещения пробника вдоль оси z является шаговый двигатель ШДИ-200-3 с биполярным включением обмоток, управление которым осуществляется ПК через привод УШД200. Двигатель работает в полушаговом режиме. Частота импульсов, подаваемых в обмотки двигателя, равна 1 кГц. Одному полному обороту вала двигателя соответствует 400 управляющих импульсов.

Блок-схема управления приводом представлена на рис. 8. Управляющий компьютер передает в привод команды управления по последовательному каналу RS232.

Между компьютером и приводом УШД200 введена гальваническая развязка (оптрон АОТ101АС). Микроконтроллер (МК) AT89s8252 фирмы «Atmel» [6] посылает в контроллер L297 тактовые импульсы с частотой 1 кГц, по которым формируются импульсы питания обмоток шагового двигателя ШДИ-200. Драйвер L298 усиливает сформированные в контроллере импульсы и подает их на двигатель ШДИ-200.

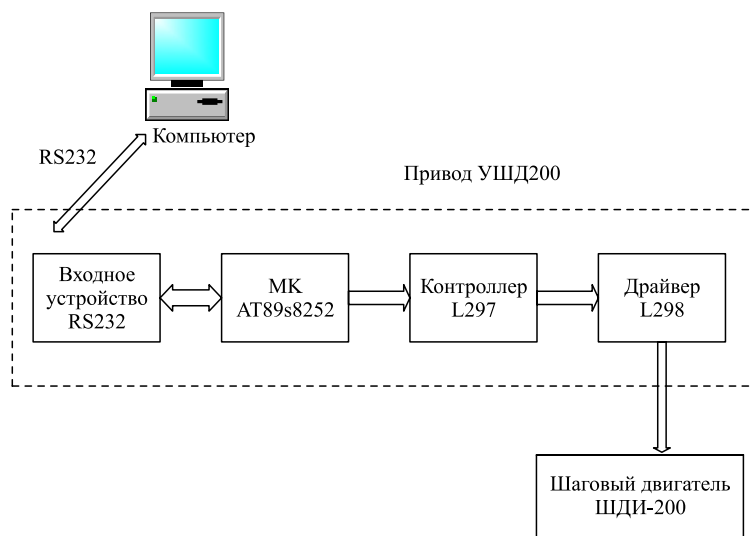


Рис. 8. Блок-схема привода УШД200

Приводом обеспечиваются следующие режимы управления шаговым двигателем:

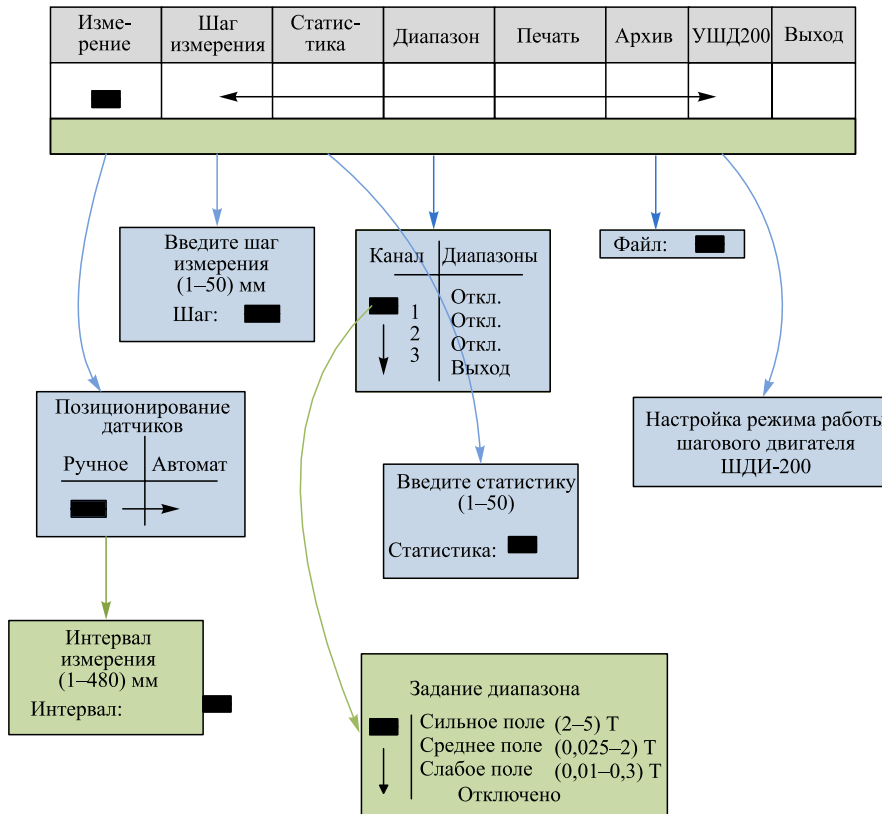
- «пуск»,
- «стоп»,
- «реверс»,
- «задание скорости вращения вала двигателя»,
- «задание шага перемещения каретки с пробником с точностью не хуже $\pm 0,25$ мм».

Для снижения нестабильности параметров системы позиционирования все измерения проводятся при аксиальном движении пробника в одном и том же направлении — снизу вверх. Обратный ход пробника, как правило, производится вхолостую.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТЕНДА

Программное обеспечение позволяет оператору вести управление магнитометром от ПК, обеспечивает вывод, обработку и представление результатов измерений.

Главная программа «ММЗ», поддерживающая работу стенда с магнитометром ХЗМ, создана на языке TURBO PASCAL. Программа управления шаговым двигателем «С24» написана на языке ASSEMBLER и «защита» во flash-память МК AT89s8252. Пользовательский интерфейс (программа «ММЗ»)



*Выбор режима — нажать «Enter»
 *Выход из программы — «Esc»

Рис. 9. Пользовательский интерфейс управления стенда

представлен на рис. 9. Курсор может передвигаться по таблице. Нажатием клавиши «return» из выбранной позиции вызывается окно, в котором задается нужный режим работы стенда. Измерение магнитного поля может проводиться либо в ручном режиме, либо, при измерении распределения поля вдоль продольной оси, в автоматическом режиме.

В ручном режиме измерения задается начальное положение пробника и интервал перемещения. В режиме автоматического измерения магнитных полей возможно использование двух режимов:

— «дискретное перемещение пробника с заданным интервалом перемещения и измерение полей во время его остановок»;

— «непрерывное перемещение пробника и измерение полей по мере прохождения заданного интервала».

При запуске по команде «измерение» происходит инициализация устройства позиционирования. Каретка с пробником устанавливается в начальное положение — крайнее нижнее положение по оси z . По команде «пуск» каретка перемещается вверх (по оси z) на заданное расстояние. Скорость перемещения каретки 6,2 мм/с.

СИСТЕМА ВЫВОДА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерения индукции магнитного поля в гауссах выводятся на экран монитора управляющего компьютера в каждой фиксированной точке измерений в режиме реального времени или по завершении цикла с набором статистики, а также после обработки в удобном для оператора виде (табличном или графическом) и заносятся в архив. Программное обеспечение предполагает установку с монитора управляющего компьютера измерительного диапазона для каждого из используемых каналов: «Сильные поля», «Средние поля», «Слабые поля» (см. табл. 2).

Периодичность импульсов, дающих разрешение на старт измерений (частота измерительных циклов), устанавливается оператором. На монитор компьютера выводятся как текущее значение (только что измеренное) поля, так и среднеквадратичное значение вместе с погрешностью, полученное из обработки результатов нескольких измерений в одной точке. Измерения со статистической обработкой увеличивают точность измерений и дают представления о погрешности измерений, но в то же время увеличивают время измерения магнитного поля в одной точке, которое пропорционально количеству циклов измерений. Как наиболее оптимальный, в большинстве случаев используется режим работы со статистической обработкой десяти измерений. Таким образом, при частоте измерительных циклов 1 Гц среднее время измерения индукции магнитного поля в одной точке не превышает 20 с (время, необходимое для десяти циклов измерений, плюс время, связанное с перемещением пробника из одной точки в другую), при этом среднеквадратичная статистическая погрешность измерений составляет величину порядка десятых долей гаусса.

ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Примеры распределений $B_z(z)$, $B_r(z)$, $B_r(\varphi)$, измеренных на стенде в качестве тестовых, представлены на рис. 10, 11. Зависимости $B_z(r)$, $B_r(r)$ специально не измерялись. Изменения полей в зависимости от радиуса оценивались при анализе результатов измерения $B_z(z)$, $B_r(z)$, выполненных при различных положениях датчика Холла ДХ2 по радиусу ($r = 0, 2, 4, 7, 14$ мм).

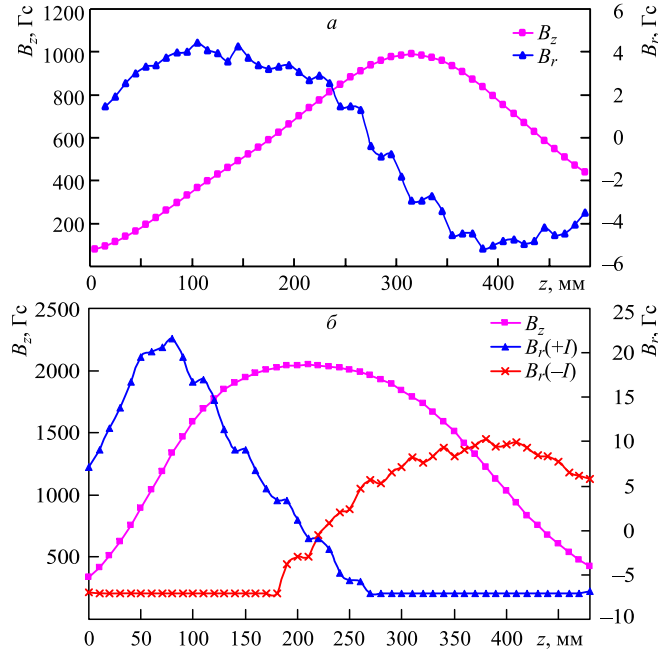


Рис. 10. Примеры осевого распределения компонент $B_z(z)$, $B_r(z)$: а) для поля одной катушки; б) для поля двух катушек

На рис. 10 представлено распределение компонент $B_z(z)$, $B_r(z)$ катушек фокусирующего соленоида ускорителя ЛУЭ-200 при номинальном токе катушек (300 А) в разных комбинациях: для одной катушки и для двух катушек.

На рис. 10, б виден характер «насыщения» преобразователя ДХ2, измеряющего $B_r(z)$, при переходе поля B_r в область отрицательных значений, превышающих -7 Гс. В таких случаях недостающая часть зависимости $B_r(z)$ измерялась при перемене направления тока в катушках на противоположное ($+I$ на $-I$), т. е. полная зависимость $B_r(z)$ восстанавливалась из двух кривых: $B_r(+I)$ и $B_r(-I)$.

Наличие некоторого риппла на кривых $B_r(z)$ свидетельствует о возможном существовании угловой нестабильности положения датчика ДХ2, измеряющего радиальную компоненту поля, при движении каретки с пробником вдоль оси z . Оценки угловой нестабильности положения датчика ДХ2 и ее влияния на результаты измерения были проведены исходя из допусков, определяющих класс точности размеров и чистоты поверхностей, достигнутых при изготовлении деталей механизма перемещения. При заданном пятом классе точности изготовления деталей угловая нестабильность положения датчика ДХ2 относительно вектора осевой компоненты магнитного поля должна быть

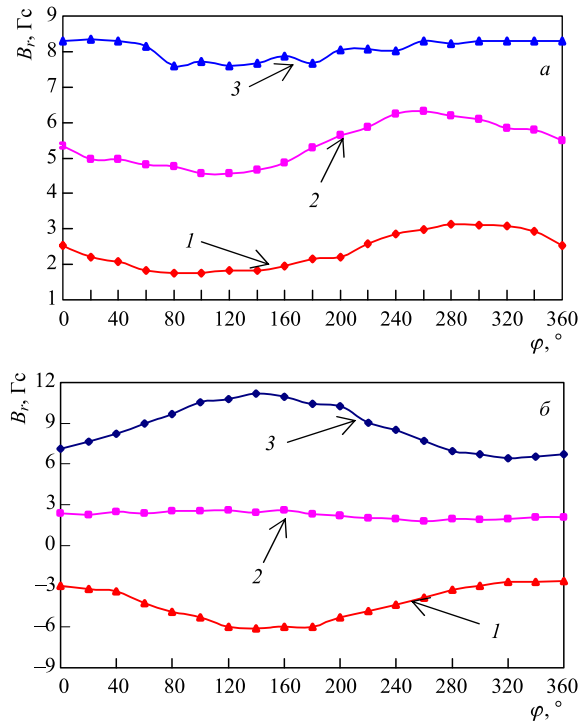


Рис. 11. Примеры азимутального распределения $B_r(\varphi)$: а) компонента поля одной катушки при изменении положения датчика ДХ2 по радиусу: 1 — $r = 0$, 2 — $r = 2$, 3 — $r = 4$ мм; б) компонента при сложении полей двух катушек: 1 и 3 — поля отдельных катушек, 2 — суммарное поле двух катушек

не хуже $\pm 1,5$ мрад, что определяет пространственную точность позиционирования преобразователей Холла и, в конце концов, адекватность созданного стенда поставленным задачам.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СТЕНДА

Испытательный магнитометрический стенд, предназначенный для моделирования и тестирования магнитных полей катушек соленоида фокусирующего канала транспортировки пучка ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН, обладает следующими возможностями:

- три канала измерения (холловские датчики ДХ1, ДХ2, ДХ3)
- датчиками Холла типа ПХЭ 605-118

импульсным током питания датчиков Холла	1 А
длительностью импульса тока питания	0,5 мс
частотой измерения	300 Гц
чувствительностью холловских преобразователей	10^{-1} Гс
длиной кабеля пробника (датчик Холла – магнитометр ХЗМ)	5 м
максимальным уровнем измеряемых магнитных полей	до 50 кГс
относительной точностью измерения магнитного поля	0,05 %
пространственным разрешением (размеры датчиков Холла)	$0,75 \times 0,25$ мм
линейной точностью перемещения каретки с пробником по оси z	не хуже $\pm 0,5$ мм
угловой нестабильностью положения датчика Холла при перемещении каретки с пробником по оси z	не хуже $\pm 1,5$ мрад

Для тестирования магнитных полей в полной сборке фокусирующего соленоида первой ускоряющей секции ускорителя на штатном месте система позиционирования модифицируется. Короткий направляющий швеллер заменяется на более длинный, соответствующий полной длине соленоида ($L \sim 3000$ мм). При этом механизмы и возможности перемещения пробника по другим координатам сохраняются. Диапазоны перемещения пробника с датчиками Холла ДХ1 и ДХ2 по трем координатам в двух вариантах системы позиционирования представлены в табл. 3.

Таблица 3. Размеры области сканирования

Координата	Варианты системы позиционирования	
	«Короткий» стенд (одна или две катушки)	Соленоид, установленный на штатном месте на ускорителе (16 катушек)
z , мм	0–484	0–3000
r , мм	–2 – +14	–2 – +14
φ , °	0–360 (дискретно по 10°)	0–360 (дискретно по 10°)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан стенд для отработки методики измерения и формирования магнитного поля электромагнитов соленоидального канала транспортировки пучка ускорителя ЛУЭ-200 и проведения испытаний и паспортизации катушек фокусирующего соленоида первой ускоряющей секции и коротких соленоидов фокусирующей системы ускорителя ЛУЭ-200. На стенде обеспечена

возможность измерения распределения магнитных полей $B_z(z)$, $B_r(z)$, $B_r(\varphi)$, $B_z(\varphi)$ при фиксированных значениях радиуса точек измерения в диапазоне $r = 0-14$ мм.

Результаты формирования магнитного поля в полном объеме фокусирующего соленоида первой ускоряющей секции, установленного в штатном месте на ускорителе ЛУЭ-200, представляются отдельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Novohatsky A. et al.* Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN) // Proc. of the 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory. JINR, D1-9-13-459. Dubna, 1994. P. 197.
2. *Aksenov V.L. et al.* Proposal for the Construction of the New Intense Resonance Neutron Source (IREN). JINR, E3-92-110. Dubna, 1992.
3. *Makoveev V.K.* Hall Three-Channels Magnetometer (H3M) // Proc. of the 9th Intern. Magnet Measurement Workshop (IMMW-9). CEA, Saclay, France, 1995.
4. *Понов С. А.* ОИЯИ, P10-86-398. Дубна, 1986.
5. *Karpukhin A.V. et al.* Magnetic Calibration Stand (2 T) for Testing of Irradiation Influence on Magnetic Field Sensors // Proc. of the 11th Intern. Magnet Measurement Workshop (IMMW-11), BNL, Upton, NY, USA, 1999.
6. Atmel Corporation 8051 Flash Microcontroller Data Book. San Jose, 1997.

Получено 20 мая 2011 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 13.09.2011.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,62. Тираж 230 экз. Заказ № 57425.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/