

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

1498 / 83

21/3-83  
P13-82-912

Л.Н.Ахманова, В.М.Лачинов, В.К.Маковеев,  
А.М.Стариков

ХОЛЛОВСКИЙ МАГНИТОМЕТР  
С ПОВЫШЕННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ  
СПОСОБНОСТЬЮ  
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Направлено в журнал  
"Приборы и техника эксперимента"

1982

В процессе создания сверхпроводящего калибровочного магнитного стенда необходимо сформировать в его "теплом" рабочем объеме  $\Delta z \sim 4$  см/ магнитное поле с величиной индукции  $B$  до  $\sim 5$  Т и однородностью  $\sim 10^{-5}$  В/см. Ниже рассмотрен разработанный в ОНМУ ОИЯИ для решения этой задачи соответствующий холловский магнитометр для стационарных магнитных полей с высокой разрешающей способностью, который, кроме того, может служить в качестве измерителя широкого применения.

Разработанные ранее магнитометры<sup>1/</sup> позволяют измерять индукцию  $B$  в указанном диапазоне полей с приведенной погрешностью до 0,01%. Чтобы повысить разрешающую способность подобных приборов при измерении достаточно однородных полей с использованием выходных цифровых вольтметров /ЦВ/ с погрешностями до  $\sim 0,01\%$ , была применена методика градиентных или относительных измерений. Кроме того, что эта методика дает возможность регистрировать малые относительные отклонения, она позволяет ослабить влияние на результаты измерений внешних причин, таких, как изменения температуры, нестабильности источников питания, механические переносы, электромагнитные помехи.

В конструкцию рассматриваемого ниже магнитометра были дополнительно введены усовершенствования по сравнению с конструкциями, описанными в работах<sup>1/</sup>, что позволило достигнуть разрешающей способности  $\sim 10^{-5}$  Т в полях до  $\sim 5$  Т. Используются отечественные ДК типа ПХЭ-602, имеющие чувствительность по магнитному полю  $\sim 0,1$  В/Т и собственные шумы, величина которых не менее чем на порядок ниже требуемого уровня разрешающей способности данных датчиков. Возможные нестабильности на выходе ДХ не должны превышать  $\sim 1$  мкВ. Температурные коэффициенты ЭДС Холла  $\sim 5 \cdot 10^{-3} \%$ /°С, остаточного напряжения  $0,1$  мкВ/°С и сопротивления  $\sim 0,08 \%$ /°С при реально достигнутой степени термостабилизации ДХ не вызывают существенных погрешностей.

Съем сигнала с выхода ДХ и его соответствующее усиление для обеспечения прямых показаний магнитометра при измерении поля или его градиента по ЦВ необходимо производить с помощью стабильных маломощных усилителей. Используются интегральные усилители /ОУ/ типа К551УД1А /МАН 725/, которые имеют температурный коэффициент приведенного ко входу дрейфа  $\sim 1$  мкВ/°С. Практические измерения показали, что при некотором сужении полосы пропускания каналов вклад шумов ОУ в нестабильность выходного сигнала при данном уровне разрешения еще не очень существен.

Структура измерительного канала и высокое входное сопротивление указанного ОУ /~1,5 МОм/ устраняют практическое влияние изменения выходного сопротивления ДХ /которое увеличивается в несколько раз в диапазоне полей до ~5 Т вследствие магнито-резистивного эффекта в материале датчика/ на коэффициент передачи канала.

В данном случае при измерениях магнитного поля продолжительность экспериментов на соленоиде обычно ограничивалась несколькими часами, и поэтому требования к длительной временной нестабильности были не очень высокими, однако все же желательно было дополнительно повысить стабильность тока питания ДХ и степень термостабилизации основных узлов магнитометра.

На рис. 1 представлена блок-схема магнитометра с двумя основными измерительными каналами. Стабильный источник тока /7/ питает последовательно включенные по входным цепям ДХ /5,6/, каждый из которых помещен в отдельный термостат /15 и 16/. Усилители /9,10/ измерительных каналов обеспечивают выходные сигналы /1,2/, которые регистрируются ЦВ /17/ в единицах магнитного поля. С помощью дифференциального усилителя /11/ реализуется градиентный канал с выходом /3/. В этом случае датчики объединяются в виде градиентного пробника с фиксированным расстоянием между центрами ДХ и одинаковой ориентацией их в пространстве. Выход /3/ может также использоваться для регистрации разности выходных сигналов /1,2/ при относительных измерениях. Компаратор /13/ совместно с источником регулируемого опорного напряжения /12/ служит для относительной регистрации на выходе /4/ с повышенной разрешающей способностью одного из сигналов с выходов /1/ или /2/ в любой точке их динамического диапазона. Температурная стабилизация основных узлов магнитометра обеспечивается тремя термостатами /14,15,16/ и схемой управления /8/.

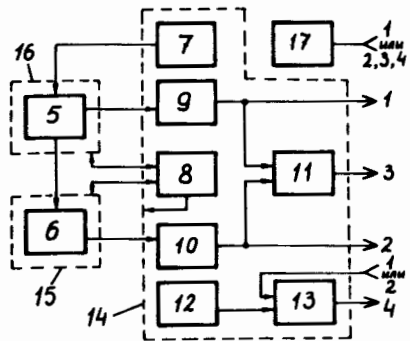


Рис. 1. Блок-схема магнитометра с повышенной разрешающей способностью.

На рис. 2а показана принципиальная схема измерительного и градиентного каналов. В схеме применены сопротивления типа БЛП или высокостабильные проволочные резисторы. В каналы поставлены отобранные по минимуму температурного дрейфа ОУ МАА 725 /ЧССР/ с учетом знака дрейфа, чтобы поднять общую стабильность каналов. Выходы ДХ подсоединены через повторители на ОУ /М1, М2/ ко входу дифференциального ОУ /М3/, что обеспечило высокие входные сопротивления для ДХ. В ОУ /М3/ происходит выделение

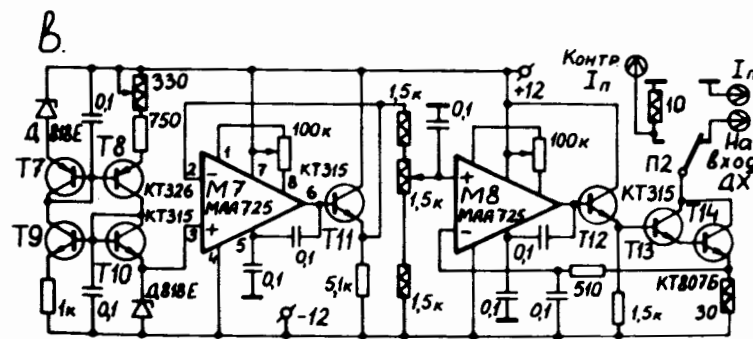
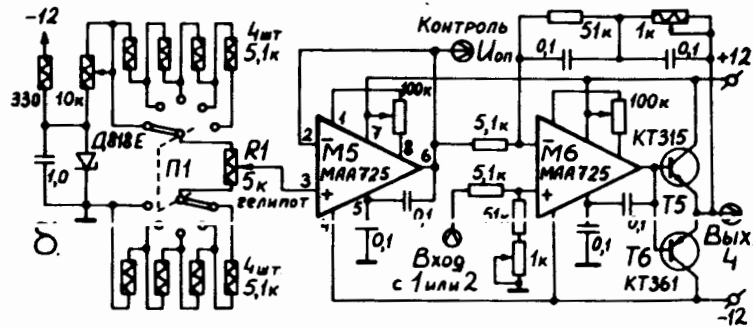
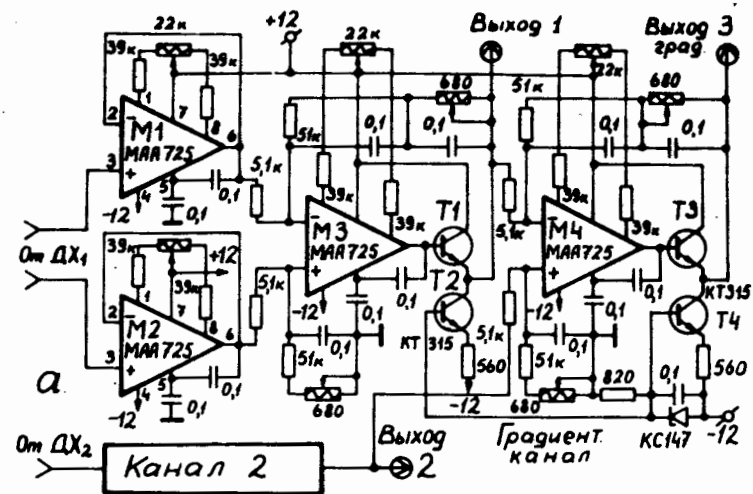


Рис. 2. Принципиальные схемы узлов магнитометра: а - измерительный и градиентный каналы; б - компаратор с источником регулируемого опорного напряжения; в - стабильный источник тока для питания ДХ.

измеряемого сигнала с ДХ и его усиление в  $\sim 10$  раз, чтобы обеспечить прямопоказание результатов измерения. Подстройка нуля на выходе канала производится в отсутствие измеряемого поля, а установка коэффициента усиления в ОУ /М3/ осуществляется путем одновременного изменения регулировочных сопротивлений в цепях инвертирующего и неинвертирующего входов, при этом критерием правильности регулировки и баланса ОУ является сохранение на выходе нулевого сигнала.

Градиентный канал включает дифференциальный ОУ /М4/ с выходным повторителем на Т3, Т4. Коэффициент усиления каскада задан равным 10. Для расширения функциональных возможностей измерителя в него введен компаратор с дополнительным усилением в 10 раз разностного сигнала /рис. 26/. Он включает дифференциальный ОУ /М6/, на один вход которого подается измеряемый сигнал с выхода /1/ или /2/, а на другой - регулируемое высокостабильное опорное напряжение. С помощью устройства можно исследовать малые изменения магнитных полей, уровень которых лежит в диапазоне до 5 Т /или 5 В/. Опорное напряжение формируется с помощью стабилитрона Д818К, делителя напряжения с переключателем П1 и переменным сопротивлением R1 с последующим повторителем на ОУ /М5/. Получается пять одновольтовых диапазонов в пределах  $0 \div 5$  В с плавной регулировкой в каждом диапазоне с помощью гелипота R1. Благодаря термостабилизации основных элементов устройства достигается стабильность опорного напряжения лучше 0,001%.

Стабильность тока питания ДХ ( $I_{\text{Д}}$ ) непосредственно определяет точность работы измерительного канала. Приняты дополнительные меры для улучшения стабилизации тока  $I_{\text{Д}}$  по сравнению с ранее достигнутой /1/. В схему /рис. 2в/ введен развязывающий повторитель между источником опорного напряжения и собственно стабилизатором тока. В качестве ОУ /М7, М8/ использованы модули МАА 725 и улучшена термостабилизация схемы. В результате получена стабильность лучше 0,001%. Заметим, однако, что при градиентных и относительных измерениях, когда ДХ питаются последовательно одним током, требования к стабильности  $I_{\text{Д}}$  могут быть менее жесткими.

Схема термостабилизации, использованная в магнитометре, аналогична описанной в /1/, но замена входных ОУ на МАА725 и некоторые конструктивные изменения улучшили стабильность температуры  $\sim +/40 \div 45/^\circ\text{C}$  в термостатах до  $\sim 0,05^\circ\text{C}$  в диапазоне внешних комнатных температур после прогрева в течение более 30 мин. Каждый ДХ помещен в свой блок термостата с подогревателем и термосопротивлением, которые вместе с концом кабеля связи закреплены в алюминиевом корпусе с размерами 14x16x25 мм. Корпус заземлен через экран кабеля связи, имеющего длину  $\sim 6$  м. Одна из плоскостей корпуса выставлена параллельно плоскости ДХ и является опорной.

Магнитометр выполнен в виде трех блоков, вставляемых в кейт КАМАК. Два блока шириной 5 М, содержащих по два источника

питания типа БСУ, располагаются в левой части кейта. Измерительный блок шириной 8 м включает основные схемы магнитометра и термостат. Все внешние выходы прибора подключены к разъемам типа ЛЕМО на передней панели. Там же имеется стрелочный измеритель или разъем для подключения внешнего прибора, по которому, как и в /1/, с помощью клавишного переключателя проверяются величины напряжений питания, тока  $I_{\text{Д}}$  и работа термостатов.

Регистрация результатов измерений магнитных полей производится с помощью ЦВ типа TR-8515 с погрешностью менее 0,01%. При верхних значениях шкал его поддиапазонов - 0,6 В и 6 В дискретность измерения составляет соответственно -10 и 100 мкВ. Результаты измерения разрешающая способность измерений полей достигает  $\sim 10^{-4}$  Т в диапазоне до  $\sim 5$  Т. Вследствие нелинейности ДХ и расходимости его показаний в полях разной полярности погрешность получаемых с его помощью результатов /по регистратору 1 В соответствует 1 Т/ превышает 0,1%. Градиентный канал и дополнительный усилитель обеспечивают при измерениях разностных значений магнитных полей гораздо большую разрешающую способность:  $\sim 10^{-5}$  Т в полях до  $\sim 5$  Т и при использовании ЦВ с ограниченной точностью.

Высокая стабильность каналов и тщательная их подстройка, а также коррекция результатов измерения по калибровочным таблицам, полученным при градуировке прибора с помощью ЯМР магнитометра на магнитном стенде ОНМУ, позволяют регистрировать абсолютные значения магнитных полей с относительной погрешностью  $\sim 0,01\%$ .

Первым применением магнитометра было измерение и коррекция магнитного поля сверхпроводящего магнитного стенда, предназначенного для настройки и калибровки магнитометрической аппаратуры. Основой стенда является сверхпроводящий соленоид с однородным магнитным полем до  $\sim 5$  Т в "теплом" рабочем объеме, который обеспечивается сквозным цилиндрическим антикриостатом, расположенным вдоль оси соленоида z, с диаметром отверстия при комнатной температуре  $\sim 8$  см. Для измерения распределения поля в рабочем объеме стенда использовалось приводное ручное устройство, которое закреплялось на нижнем фланце криостата. Вдоль оси антикриостата перемещался цилиндрический измерительный шток. На верхнем конце штока установлена перпендикулярно оси штока каретка, на которой на разных радиусах можно закреплять датчики, которые могут вращаться по радиусу и перемещаться вдоль оси вращения штока.

Проведен ряд сеансов измерений поля и формирование его с помощью изменения числа витков в корректирующих обмотках. При измерениях использовался режим "замороженного" магнитного поля в соленоиде, при котором спад поля за час составлял  $\sim 0,01\%$ . Кроме того, проведены эксперименты по изучению влияния на однородность поля сверхпроводящих цилиндрических экранов. На рис. 3 в качестве иллюстрации показаны одновременно измеренные распределения маг-

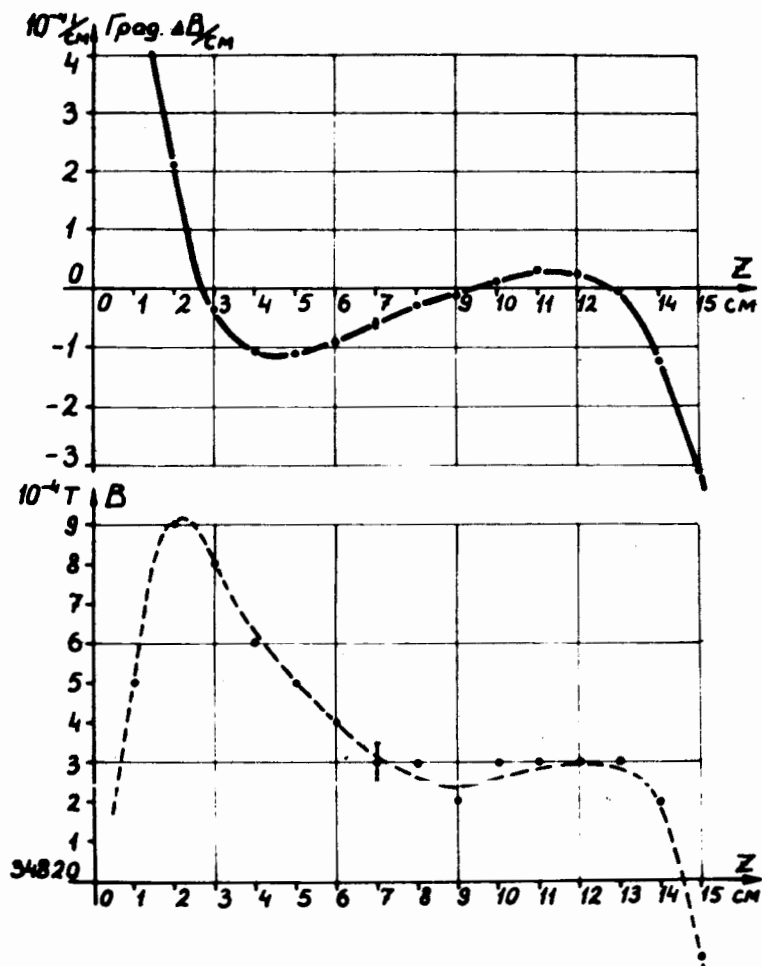


Рис. 3. Распределения магнитного поля В и его градиента  $\Delta B/\text{см}$  по оси z в рабочей области сверхпроводящего соленоида, одновременно измеренные с помощью данного магнитометра.

нитного поля В и его градиента  $\Delta B/\text{см}$  по оси z соленоида в области с относительно однородным полем. Видны дискретность в измерении поля  $\sim 10^{-4} \text{ Т}$  и на порядок более высокое разрешение при измерении градиента, что показывает неплохие возможности магнитометра.

При измерениях азимутальных распределений поля на разных радиусах с помощью указанного выше привода возникает погрешность, связанная с тем, что ДХ чувствителен к направлению поля, а магнитная ось поля соленоида не совпадает с геометрической осью

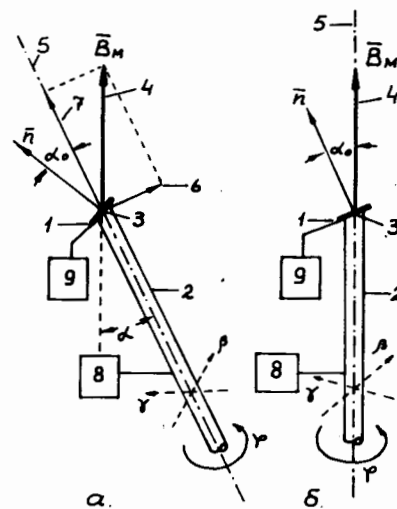


Рис. 4. Схемы для иллюстрации способа измерения направления магнитного поля с помощью одного ДХ.

криостата и соответственно с осью вращения измерительного штока в пределах  $1 \div 2$  градусов из-за неточностей механического изготовления и монтажа. Ниже рассмотрен простой способ устранения этой несоосности, который может использоваться и сам по себе для точного измерения направления магнитного поля в точке расположения ДХ.

На рис. 4 показаны схемы, поясняющие сущность предложенного способа измерения направления вектора магнитного поля с помощью одного ДХ. Укрепленный на конце измерительного штока /2/ ДХ, 1 вращают по углу  $\phi$  в магнитном поле  $\vec{B}_M$  /4/ вокруг оси /5/, которая проходит через центр ДХ, 3 и наклонена на угол  $\alpha_0$  относительно нормали  $\vec{n}$  к магнитной плоскости ДХ. Начальное положение оси /5/ /рис. 4а/ относительно  $\vec{B}_M$  соответствует угловому отклонению  $\alpha$ . Составляющая /7/ вектора  $\vec{B}_M$ , направленная вдоль оси /5/, при вращении ДХ не вызывает на его выходе сигнала первой гармоники, тогда как составляющая /6/, перпендикулярная оси /5/, возбуждает на выходе ДХ такой сигнал. При этом амплитуда сигнала первой гармоники равна:

$$U_{\text{ХМ1}} = K_{\text{Х}} \cdot B_{\text{М}} \cdot \sin \alpha_0 \cdot \sin \alpha, \quad /1/$$

где  $K_{\text{Х}}$  - коэффициент преобразования ДХ. Фаза сигнала первой гармоники показывает направление отклонения оси /5/ от  $\vec{B}_M$ . При уменьшении угла  $\alpha$  величина  $U_{\text{ХМ1}}$  снижается и при  $\alpha = 0$  становится равной нулю, что показывает совпадение направлений оси /5/ и  $\vec{B}_M$  /рис. 4б/. При этом зависимость  $\sin \alpha$  в /1/ обеспечивает максимальную чувствительность при значениях  $\alpha$  вблизи нуля. Кроме того, при использовании данного способа отпадает необходимость в знании с высокой точностью положения магнитной плоскости ДХ, что важно, поскольку определение положения и фиксация этой плоскости для ДХ, являющихся весьма миниатюрными приборами, является сложной задачей. Согласно /1/ чувствительность способа изменяется согласно  $\sin \alpha_0$ , а  $\alpha$  можно выбирать в пределах до  $90^\circ$ . Также нужно заметить, что регистрация выходного сигнала первой гармоники, являющегося разностным сигналом, служит лишь для определения момента исчезновения сигнала при повороте измери-

тельного штока по угловым координатам  $\gamma, \beta$  согласно фазе гармоники относительно центра ДХ. При этом погрешность фиксации указанного положения практически определяется выходными шумами и разрешающей способностью измерителя и, следовательно, предельно мала.

Практическая проверка показывает, что особенно для высоких магнитных полей достаточно иметь  $\alpha_0$  порядка градуса или менее, так как разрешение прибора достигает  $\sim 10^{-5}$  Т и результирующее угловое разрешение при определении направления вектора  $\vec{B}_M$  может быть менее угловой минуты. Выбор малого  $\alpha_0$  полезен с точки зрения возможности пренебречь влиянием планарного эффекта ДХ на выходной сигнал, а также возможностью судить по полному сигналу ДХ об амплитуде вектора  $\vec{B}_M$  в измеряемой точке одновременно с определением его направления. Регистрация направления легко осуществляется с максимально возможной точностью по угловому положению измерительного штока, имеющего достаточно большие и удобные для измерения относительно внешних опорных фигур размеры.

В конкретном случае для магнитного стенда, чтобы совместить ось вращения измерительного штока с магнитной осью соленоида, успешно применили в качестве регистратора /9/, рис. 4, рассмотренный выше магнитометр /канал 1 и компаратор/. В качестве устройства для ориентации /8/ измерительного штока по углам  $\gamma$  и  $\beta$  использовали регулировку механизма крепления ручного привода с помощью трех опорных регулируемых винтов относительно нижнего фланца криостата стенда. При этом датчик устанавливали на оси вращения штока и задавали угол  $\alpha_0$  в пределах нескольких градусов. С использованием реального разрешения магнитометра при уровне поля  $\sim 3$  Т и угловой регулировке положения штока проведено определение магнитной оси соленоида и ее совмещение с осью вращения штока с погрешностью не более угловой минуты. После этого проводились измерения азимутальных распределений поля на разных радиусах и при разных положениях относительно оси  $z$  в рабочем объеме соленоида.

Приведенная методика определения направления поля и практические измерения показали реальность создания достаточно простого и точного измерителя направления и величины магнитного поля с помощью одного ДХ, обеспечивающего ряд дополнительных преимуществ по сравнению, например, с трехкомпонентными холловскими магнитометрами, служащими для аналогичных целей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лачинов В.М., Маковеев В.К., Стариков А.М. ОИЯИ, Р9-12517, Дубна, 1979; ПТЭ №6, 1980, с.135.

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 декабря 1982 года.

Ахманова Л.Н. и др.

P13-82-912

Холловский магнитометр с повышенной разрешающей способностью и его применение

Описан прибор, предназначенный для измерения стационарных магнитных полей до  $\sim 5$  Т и их неоднородностей. В магнитометре имеются два измерительных канала, один из которых является градиентным, а другой служит для регистрации отклонения измеряемой величины относительно опорного сигнала. Регистрация результата осуществляется с помощью внешнего цифрового вольтметра с погрешностью  $\sim 0,01\%$ . Разрешающая способность магнитометра при относительных и градиентных измерениях в сверхпроводящем соленоиде с "замороженным" полем достигает  $\sim 10^{-5}$  Т в полях до  $\sim 5$  Т. Осуществлен способ измерения направления магнитного поля с угловой точностью лучше минуты с помощью одного датчика Холла.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Akhmanova L.N. et al.

P13 82 912

Hall Magnetometer with Enhanced Resolution Capacity and Its Application

The device is intended for measuring the stationary magnetic fields upto  $\sim 5$  T and their inhomogeneities. It consists of two measuring channels, one gradient channel and that one for registration of deviation of a value measured relative to the reference signal. The result registration is performed via the external digital voltmeter with  $\sim 0.01\%$  error. Magnetometer resolution capacity for relative and gradient measurements in the superconducting solenoid with a "frozen" magnetic field is as high as  $\sim 10^{-5}$  T in the fields upto  $\sim 5$  T. The way of measuring the direction of magnetic field is realized with angular accuracy better than one minute using one Hall detector.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.