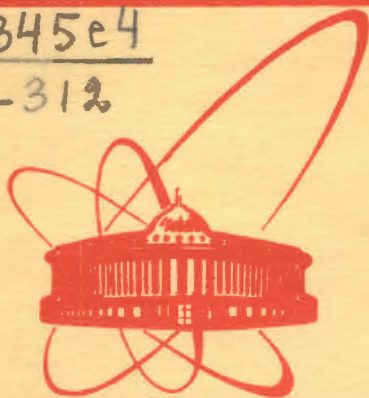


С 345e4
Л-312



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4916/2-79

3/12-79
P9 - 12517

В.М.Лачинов, В.К.Маковеев, А.М.Стариков

ХОЛЛОВСКИЕ МАГНИТОМЕТРЫ
ДЛЯ СТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
С ОТСЧЕТОМ В ЕДИНИЦАХ ПОЛЯ

1979

Лачинов В.М., Маковеев В.К., Стариков А.М.

Холловские магнитометры для стационарных магнитных полей с отсчетом в единицах поля

Описаны созданные в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ холловские магнитометры для стационарных магнитных полей. Они отличаются простотой конструкции, многоканальностью, возможностью измерений градиентов полей и позволяют регистрировать результаты в цифровом виде в единицах магнитного поля. С использованием цифровых вольтметров достигнута точности измерения полей $\sim (1 \pm 2) \cdot 10^{-4}$ в диапазоне $\sim 2,5$ Т. В одноканальном магнитометре широкого применения типа МПХ-1М осуществлен режим повышения линейности измерительного канала, а также введен автономный цифровой регистратор.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ

Препринт Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1979

Lachinov V.M., Makoveev V.K., Starikov A.M.

Hall Probe Magnetometers for Stationary Magnetic Fields with the Registration in the Magnetic Field Units

Hall probe magnetometers for stationary magnetic field measurements are considered. They have a simple construction, a number of measuring channels, the gradient measuring channel and enable to registrate measurements in units of magnetic field. Using digital voltmeters the measurement accuracy equals about $(1 \pm 2) \cdot 10^{-4}$ for the magnetic fields of about 2.5 T. In the one channel magnetometer of MPKh-1M type a measurement mode with improved channel linearity has been realized and the internal automatic digital registrator has been introduced.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

1. ВВЕДЕНИЕ

В практике магнитных измерений на установках, связанных с созданием прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов /КУТИ/ в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ, широкое применение находит магнитометрическая аппаратура с использованием датчиков Холла /ДХ/ в качестве магниточувствительных элементов^{1/}. Составной частью разработанного комплекса холловских магнитометров являются измерители стационарных магнитных полей типа МПХ. Эти магнитометры отличаются разнообразием функциональных возможностей, простотой конструкции, высокой точностью измерения и позволяют регистрировать результаты в цифровом виде в единицах магнитного поля. Создано несколько вариантов таких магнитометров, которые в течение последних лет применялись в сеансах магнитных измерений в ОНМУ, а также в других лабораториях ОИЯИ и в ИФВЭ. Ниже описаны магнитометры типов МПХ-3, МПХ-3С и МПХ-1М, предназначенные как для общих, так и для специальных целей.

2. ОБЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА МАГНИТОМЕТРОВ.

2.1. Датчики Холла.

В последнее десятилетие были созданы и внедрены в магнитометрическую технику^{2/} высокоточные ДХ. Такими датчиками, например, являются отечественные ДХ^{3/} типа ПХ-602, используемые в представленных ниже магнитометрах, а также ДХ типа SBV 585 S1 и др.^{4/} фирмы Филипс. ДХ типа ПХ-602 имеют размер чувствительной области ~ 1 мм² при толщине ~ 12 мкм.

В полях $0 \div 10$ Т их чувствительность достигает $\sim 100 \text{ мкВ/мТ}$ при температурном коэффициенте до $\sim 0,005\%/^{\circ}\text{C}$. Датчики имеют малые сопротивления $\sim 2 \div 5 \text{ Ом}$ и низкий уровень шума. ДХ практически безынерционны и допускают изменения внешней температуры в диапазоне $4 \div 373/\text{К}$. При номинальном токе питания ДХ порядка $100 \div 200 \text{ мА}$ выходное остаточное напряжение составляет менее 20 мкВ с температурным коэффициентом до $1 \div 5/\text{мкВ}/^{\circ}\text{C}$. Эти параметры ПХ-602 являются хорошей основой для создания прецизионных магнитометров. Однако применение ДХ связано с некоторыми проблемами. У ДХ имеется магниторезистивный эффект, который, например, у ПХ-602 приводит к нелинейному увеличению сопротивления датчика в ~ 2 раза в диапазоне полей $0 \div 2/\text{Т}$. Возникают дополнительные погрешности измерения поля из-за влияния нагрузки на ДХ, от наличия так называемого планарного эффекта^{14/}. Для ПХ-602 коэффициент нелинейности в полях до $\sim 2 \text{ Т}$ достигает $0,2 \div 1\%$. Кроме того, имеется расхожимость характеристики при изменении полярности измеряемого поля до $\sim 1 \div 2\%$, а чувствительность отдельных образцов ДХ обычно различна. Поскольку ДХ является четырехполюсником, он не допускает одновременного заземления входа и выхода, требуя специального согласования этих цепей. Это особенно существенно при комбинированном включении по входным или выходным цепям нескольких ДХ для многоканальных измерений или измерений градиентов полей.

Ниже рассмотрены некоторые способы и устройства, которые уменьшают влияние указанных недостатков ДХ на эксплуатационные и метрологические характеристики магнитометров.

2.2. Электронные компоненты и цифровые регистраторы

В настоящее время промышленно производятся высококачественные интегральные операционные усилители /ОУ/ с разнообразными параметрами для широкого применения^{5/}. Использование ОУ совместно с ДХ в магнитометрических устройствах оказалось весьма эффективным. Особенно универсальны и полезны ОУ с дифференциальным входом и малым приведенным ко входу дрейфом. Из отечественных ОУ отметим один из первых ОУ типа 1УТ401, который имеет температурный дрейф не более $5 \div 10 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$. Один из лучших последних ОУ - К551УД1/аналог

М АА725, ЧССР/ имеет температурный дрейф менее $1 \text{ мкВ}/^{\circ}\text{C}$ и другие более высокие параметры. С помощью ОУ, имеющих собственный коэффициент усиления более 10^4 , с дополнительными внешними элементами достаточно просто получить высокую стабильность усиления, регулировку усиления в широком диапазоне, балансировку дифференциального входа и коррекцию выходного смещения ОУ. Такой линейный стабильный усилитель с универсальной регулировкой стал основной составной частью рассматриваемых магнитометрических каналов.

Наиболее точными регистраторами аналоговых сигналов являются цифровые вольтметры /ЦВ/ и аналого-цифровые преобразователи /АЦП/, работающие в режиме вольтметра. Прецизионные ЦВ обеспечивают точности измерений постоянных напряжений лучше $0,01\%$ в диапазонах до долей вольта и выше. Линейность шкалы, возможность работы с внешним запуском или в автоматическом режиме, наличие в ряде приборов цифропечати - все это делает ЦВ весьма удобным и незаменимым регистратором для холловских магнитометров.

2.3. Структура магнитоизмерительных устройств

На основе совместного применения ДХ и ОУ разработана структура магнитометрического устройства^{6/}, представленная на рис. 1, которая обеспечивает как многофункциональность и высокую точность измерений, так и достаточную простоту. Во-первых, подобное устройство может иметь, например, 10 и более измерительных каналов. Таким магнитометрическим системам отдается определенное предпочтение в технике ускорителей^{12/}, поскольку они позволяют заметно сократить время магнитных измерений и упростить устройства привода пробников.

Во-вторых, при данной структуре в каждом измерительном канале осуществляется передача выходного сигнала с ДХ на последующий дифференциальный усилитель независимо от потенциала выходных электродов ДХ и выдача усилителем измеряемого сигнала относительно шины "Корпус". В результате возможно экономичное, последовательное по входным цепям включение нескольких ДХ, при котором необходим лишь один источник тока с заземленной общей шиной. При этом существенно умень-

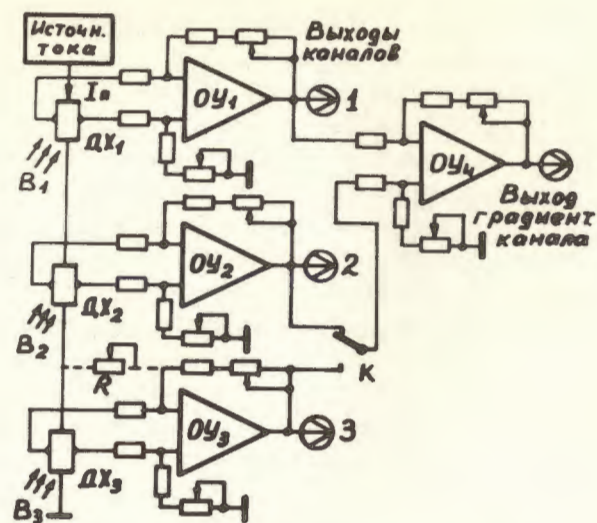


Рис.1. Структура магнитометра МПХ-3.

шается влияние входных синфазных изменений напряжений или наводок на работу измерительного канала, в том числе и от увеличения сопротивления ДХ в поле.

В-третьих, цепь регулировки выходного смещения ОУ позволяет компенсировать начальное напряжение неэквипотенциальности ДХ, а с помощью цепей регулировки усиления выравнивать чувствительности каналов, поскольку ДХ имеют обычно разные параметры, и устанавливать их такими, чтобы результат измерения по ЦВ был представлен в единицах магнитного поля.

В-четвертых, представленная на рис. 1 структура обеспечивает простой способ измерения градиентов магнитных полей, подавая сигналы с выходов любой пары каналов на дифференциальный вход дополнительного ОУ, с выхода которого снимается сигнал градиента. При этом питание ДХ одним током способствует повышению точности при измерениях градиентов или в случае относительных измерений полей по нескольким каналам.

2.4. Системы термостабилизации магнитометров

Важной задачей современной магнитометрии является создание измерителей магнитных полей с высокой разрешающей способностью. К настоящему времени в ускорительной технике требования к магнитонизмерительным приборам с ДХ по точности измерений превышают $\sim 10^{-4/2}$. В связи с этим необходим внимательный учет всех факторов, влияющих на точность регистрации полей. Одно из первых требований - это термостабилизация ряда узлов магнитометра. Во всех рассматриваемых ниже магнитометрах имеются две системы термостабилизации, включающие термостаты для подогрева. При комнатной температуре системы поддерживают с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ температуру $+35^\circ\text{C}$ в пробниках с ДХ и температуру $+45^\circ\text{C}$ в термостате измерительного блока.

На рис. 2 показаны обе схемы термостабилизации. В пробнике с ДХ устанавливается термистор R1 типа ММТ-6, который включен в плечо моста /Д1-Д4, R1-R3/. Напряжение разбаланса усиливается ОУ /М1/ и каскадом на Т3-Т5. Транзисторы Т9, Т10 управляют током в подогревателе пробника. Коррекция температуры ДХ осуществляется с помощью сопротивления R3, а сигнал для измерения и контроля температуры снимается с контакта t1. Время выхода системы на режим термостабилизации равно ~ 10 мин. В термостате для измерительных схем используется термистор типа СТ3-19, R6, включенный в плечо моста R4, R5. В остальной схеме отличается выходным каскадом, он сделан более мощным /Т11-Т13/. Введено также устройство ускоренного начального разогрева термостата. С помощью кнопки К1 и реле К2 подогреватель подключается к источнику с повышенным напряжением. Сигнал окончания разогрева с выхода усилителя отключает К2 и переключает подогреватель к выходу усилителя, о чем сигнализирует лампа Л1. На рис. 3 показана зависимость температуры в термостате при начальном разогреве с ускорением /1/ и без него /2/. Входные узлы обеих схем помещены в этом же термостате. Термостат выполнен в виде коробки 160x160x50 мм из меди толщиной 1 мм с равномерно намотанным на ней подогревателем с сопротивлением ~ 10 Ом, закрепленным эпоксидным клеем. Сигнал для контроля температуры внутри термостата снимается с контакта t2 /рис. 2/.

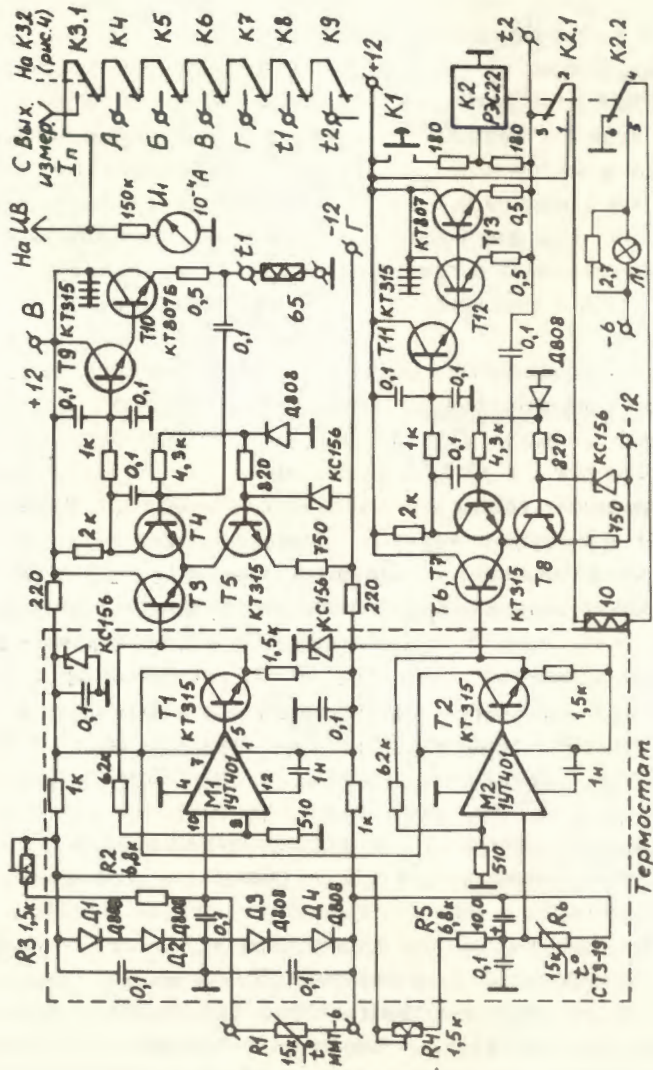


Рис.2. Схема термостабилизации пробника и измерительных узлов.

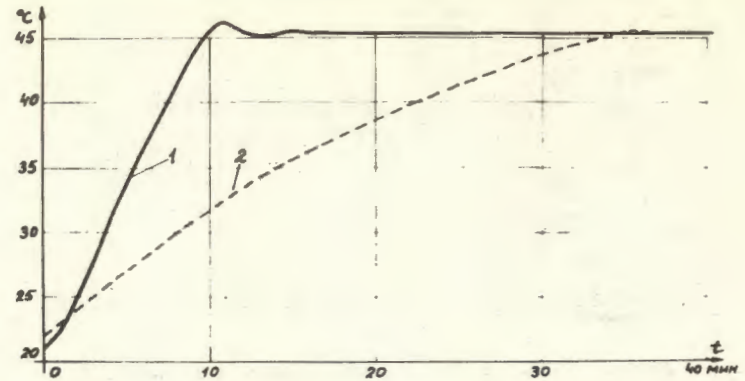


Рис.3. Характеристики разогрева термостаба для измерительных узлов в обычном /2/ и ускоренном /1/ режимах.

2.5. Стабилизатор тока питания ДХ

Стабильность тока питания ДХ непосредственно влияет на точность работы измерительного канала. На рис. 4 представлена схема стабилизатора тока. Схема параметрического стабилизатора на Д5, Д6 /Д818Е/ и Т15-Т18 является источником опорного напряжения, стабильность которого лучше $3 \cdot 10^{-5}$ в диапазоне комнатных температур и при колебаниях напряжения питания на $\pm 0,2\%$. Это определяется, во-первых, выбором режима стабилитронов в области термостабильной точки. Во-вторых, структура схемы и ее симметричность по отношению к шинам питания обуславливают коэффициент стабилизации более 1000 по напряжению питания. Кроме того, введены термокорректирующие элементы Т15, Т18, а сам стабилизатор помещен в термостат.

Через делитель R10-R12 опорное напряжение подано на неинвертирующий вход ОУ /М3/. К выходу ОУ вне термостаба подключен повторитель на составном транзисторе /Т20, Т21/, ток коллектора которого поступает во входную цепь ДХ, а в эмиттерной цепи включено опорное проволочное сопротивление R13. Падение напряжения на последнем подано на инвертирующий вход М3 и сравнивается с опорным. Разностный сигнал усиливается в М3 и корректирует выходной ток. Установка тока

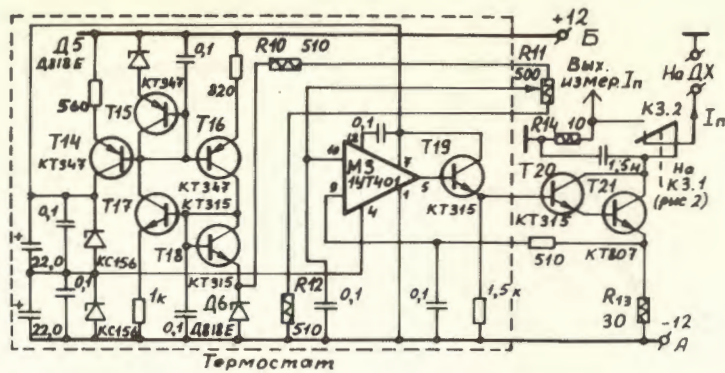


Рис. 4. Схема стабилизатора тока питания ДХ.

в диапазоне $100 \div 200$ мА и контроль его стабильности проводится по ЦВ с помощью ключа К32 и калиброванного сопротивления R14. Длительная стабильность тока после 30 минпрогрева достигает $\sim 5 \cdot 10^{-5}$.

3. МАГНИТОМЕТР ТИПА МПХ-3

Магнитометр МПХ-3 создан для измерения распределений стационарного осеально-симметричного магнитного поля в сверхпроводящей ВЧ-секции коллективного ускорителя /кольцеватрон/^{1,7/}, хотя по своим параметрам является измерителем широкого применения. С помощью МПХ-3 возможно измерение полей в диапазоне $0 \div 2,5$ Т и градиентов до $-5 \cdot 10^{-2}$ Т/см.

Структура измерительных каналов МПХ-3 показана на рис. 5. Магнитометр имеет три одинаковых измерительных канала и один градиентный. В измерительных каналах /рис. 5а/ использованы ОУ типа 1УТ401 и сопротивления типа БЛП и проволочные. Усилитель состоит из двух каскадов ОУ /М4, М5/. К дифференциальному входу М4 подключен выход ДХ. В этом каскаде выделяется сигнал, пропорциональный измеряемому полю, который усиливается в 3 раза. Посредством R15 балансируется входной каскад. С выхода М4 сигнал поступает на неинвертирующий вход ОУ /М4/, который имеет выходной повторитель на Т22, Т23 и цепь отрицательной обратной связи. Коэффициент

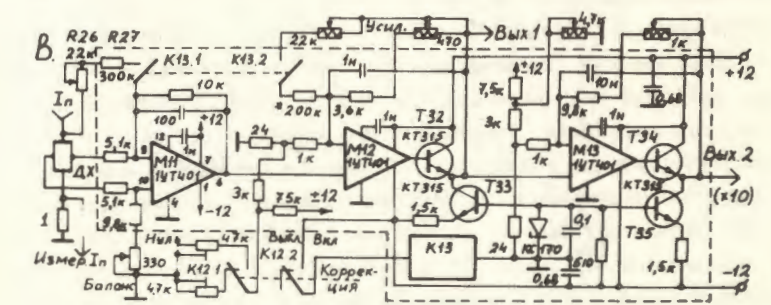
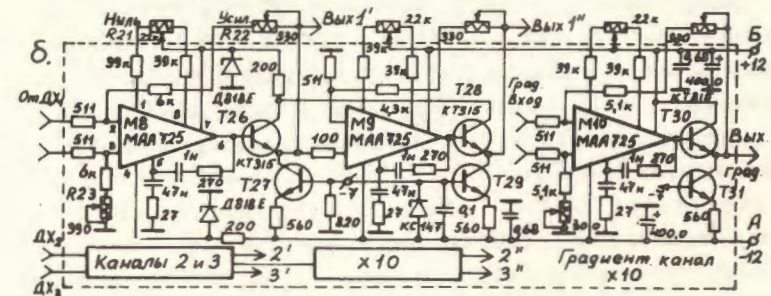
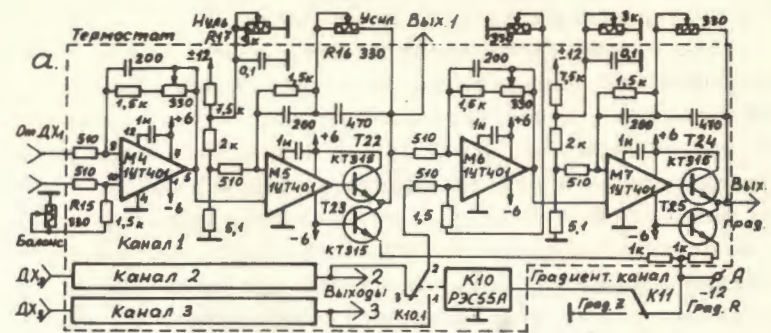


Рис. 5. Схемы измерительных каналов магнитометров МПХ-3/а/, МПХ-3С/б/, МПХ-1М/в/.

усиления второго каскада /-4/ подстраивается с помощью R16. Кроме того, посредством P17 производится подстройка нуля канала в отсутствие внешнего поля. В усилителе использованы ОУ с температурным дрейфом менее $4 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$.

Схема градиентного канала /М6, М7/ аналогична предыдущей. Инвертирующий вход канала постоянно подсоединен к выходу первого канала, а неинвертирующий вход через контакты реле К12, управляемого ключем К11, подключен либо к выходу второго, либо третьего каналов. Коэффициент усиления градиентного канала равен 10. Все элементы схем каналов находятся в термостате, за исключением подстроечных сопротивлений. Пробник МПХ-3 содержит три ДХ. В кольцетроне пробник устанавливается так, что плоскость его основания перпендикулярна оси Z. Плоскости ДХ параллельны основанию пробника. Относительно первого ДХ второй смещен по оси Z на 10 мм, а третий - по радиусу на 10 мм. Таким образом, возможно измерение полей каждым ДХ, а также градиентов по Z или R. В медном блоке термостата, кроме ДХ, установлен термистор, а поверх блока намотан подогреватель из манганиновой бифилярно-скрученной проволоки с сопротивлением $\sim 65 \text{ Ом}$. Термостат с внешним тепловым экраном имеет габариты 12х36х50 мм и укреплен на разъеме, через который подключен кабель длиной 10 м для связи с измерительным блоком МПХ-3.

Измерительная часть МПХ-3 конструктивно выполнена в виде трех блоков, вставляемых в крейт КАМАК /рис. 6/. Два блока шириной 5М включают по 2 источника питания типа БСУ. Измерительный блок шириной 8М включает термостат с основными схемами и остальные элементы. Выходы всех каналов подключены к разъемам ЛЭМО на передней панели. Для контроля работы магнитометра на передней панели установлен стрелочный индикатор И1 /рис. 3/, по которому с помощью клавишного переключателя К3÷К9 можно проверить величины напряжений питания /А, Б, В, Г/, тока питания ДХ и режим работы термостатов (t1, t2).

Регистрация результатов измерений производится по ЦВ, имеющему разрешение не хуже 10^{-4} , с устройством цифрпечати. Отсчет результатов осуществляется в единицах поля /1 В соответствует полю 1 Т, а градиент поля 1 В соответствует 0,1 Т/см/. Относительная точность измерений МПХ-3 лучше

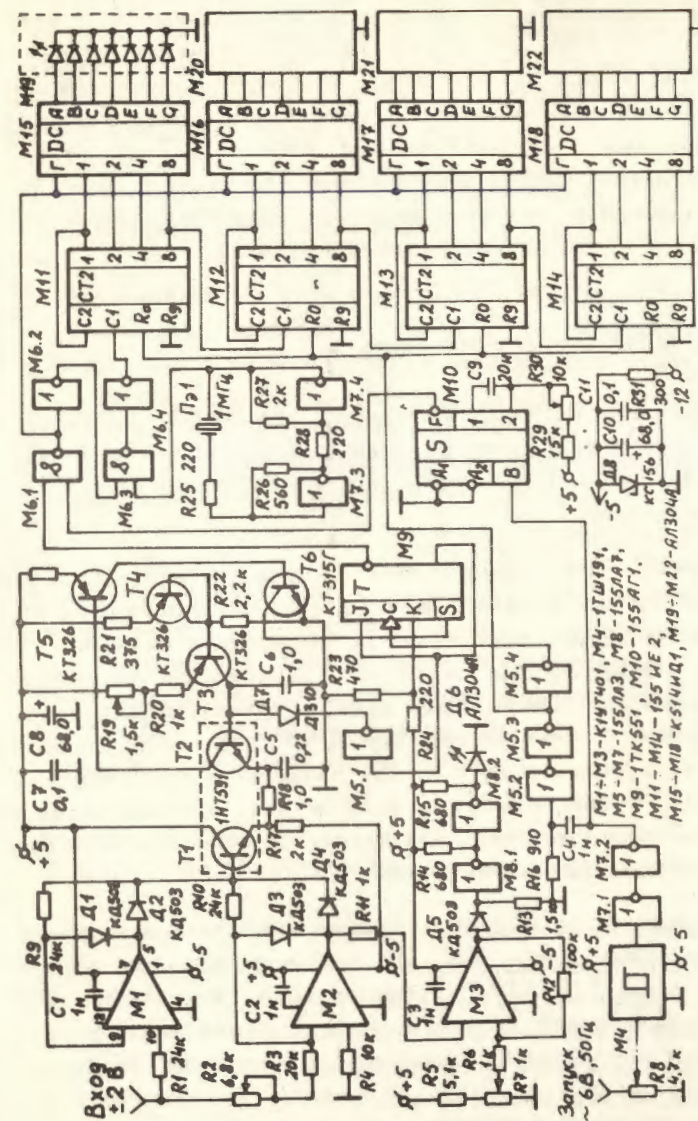


Рис. 6. Схема внутреннего цифрового регистратора МПХ-1М.

$\sim 2 \cdot 10^{-4}$. $B_x \pm 10^{-4}$ Т в диапазоне комнатных температур после прогрева прибора в течение 30 мин. Относительная точность измерения градиентов с использованием градиентного канала составляет $\sim 0,05\%$ от максимального значения диапазона. Аналогичные точности измерения абсолютных значений полей и их градиентов обеспечиваются с помощью калибровочных таблиц, полученных с использованием ЯМР - магнитометра на магнитном стенде ОНМУ. Из-за нелинейности ДХ в полях более 0,4 Т абсолютная величина поля по регистратору ограничена значением $\sim 0,2 \div 0,3\%$ от измеряемого поля.

4. МАГНИТОМЕТР ТИПА МПХ-3С

Магнитометр МПХ-3С, созданный для ИФВЭ, имеет ту же структуру, но в его схему введены изменения, которые расширили его функциональные возможности и повысили его точность измерения до $\sim 10^{-4}$.

Во-первых, для каждого канала сделан отдельный термостабилизированный пробник. Медный блочок термостата с подогревателем и конец кабеля связи помещены в медный корпус размером $10 \times 20 \times 30$ мм³ и залиты эпоксиэпидным компаундом. Корпус заземлен через экран кабеля. Длина кабеля порядка 6 м. Одна из плоскостей пробника является опорной, т.к. параллельна плоскости ДХ. Можно размещать пробники в разных точках, чтобы измерять поля в них, а также измерять соответствующие градиенты или проводить относительные измерения при топографировании полей.

Во-вторых, были модернизированы усилители всех измерительных каналов /рис. 5б/. В них использованы ОУ типа К551УД1 /МАН 725, СССР/. Кроме того, что эти ОУ имеют температурный дрейф менее 1 мкВ/°С, у них есть вход для независимой коррекции (R21) выходного смещения. В результате в каждом усилителе стало возможным ограничиться одним ОУ, поскольку все регулировки - усиления (R22), баланса (R23) и нуля (R21) - в нем имеются. Для получения более чувствительного диапазона /до $\sim 0,5$ Т/ в МПХ-3С введен дополнительный масштабный усилитель /М9/ с коэффициентом усиления 10.

Общая конструкция магнитометра МПХ-3С аналогична. Однако коммутация всех выходов измерительных каналов и входов градиентного канала, которые выведены через разъемы ЛЭМО на переднюю панель, производится с помощью внешних кабелей. Все измерительные каналы прокалиброваны на магнитном стенде до полей $\sim 2,2$ Т, хотя после соответствующей калибровки возможны измерения полей до ~ 5 Т.

5. МАГНИТОМЕТР ТИПА МПХ-1М

Одноканальный магнитометр МПХ-1М общего применения предназначен для измерения полей в диапазонах $0 \div 0,2$ Т и $0 \div 2$ Т, а при соответствующей калибровке и более высоких. Схема прибора аналогична одноканальному варианту МПХ-3 с дополнением ее масштабным усилителем с коэффициентом 10 для получения более чувствительного диапазона. Магнитометр с внешним ЦВ работает идентично МПХ-3 и имеет ту же точность измерения. В отличие от МПХ-3 в МПХ-1М имеется внутренний цифровой регистратор с точностью $\sim 10^{-3}$, что делает прибор автономным и удобным при измерениях полей со средней точностью. Кроме того, в МПХ-1М введен дополнительный режим работы с коррекцией нелинейности в диапазоне $0 \div 2$ Т. При этом возможны измерения абсолютных значений полей с точностью до $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ по цифровым регистраторам в единицах поля без коррекции по калибровочным таблицам.

5.1. Коррекция нелинейности измерительного канала

Как показал анализ, основной общей причиной нелинейности рассмотренного измерительного канала, является магниторезистивный эффект в ДХ, упомянутый выше. Это выражается, во-первых, в нелинейной зависимости напряжения неэквипотенциальности от поля. Во-вторых, изменение выходного сопротивления ДХ сказывается на коэффициенте передачи сигнала с ДХ в ОУ, так как входное сопротивление ОУ по разным причинам имеет ограниченную величину. Кроме того, наблюдается изменение чувствительности собственно ДХ от поля. Величина резуль-

тирующей нелинейности измерительного канала достигает $-0,5\%$ и более в диапазоне полей $/O \div 2/T$. На *рис. 7* показана, например, зависимость отклонений от линейной зависимости измерительного канала МПХ-1М при изменении поля. Эта кривая по форме близка к зависимости изменения сопротивления ДХ от поля.

В известных устройствах для линеаризации шкалы холловских магнитометров подбирают либо элементы с похожей характеристикой для коррекции чувствительности ДХ^{/8/}, либо формируется соответствующая нелинейная характеристика регистратора^{/9/}. В обоих случаях усложняется конструкция и требуется тщательный подбор корректирующей нелинейности.

В МПХ-1М осуществлено предложение по компенсации этой нелинейной зависимости с помощью сигнала со входа ДХ. Напряжение на входе ДХ, питаемого стабильным током, пропорционально сопротивлению ДХ. Конструкция измерительного канала позволяет просто компенсировать его нелинейность путем подачи напряжения со входа ДХ через регулируемый делитель на соответствующий вход дифференциального ОУ /*рис. 1, R*/. При этом точная подстройка для получения минимальных отклонений от линейности сводится к обычным регулировкам выходного смещения ОУ, его усиления и величины R. На *рис. 6* наглядно виден результат такой коррекции на примере измерительного канала МПХ-1М. Нелинейность канала в диапазоне $/O \div 2/T$ снижена практически на порядок. Заметим, что этот способ коррекции применим только для одной определенной полярности измеряемого поля и при наличии планарной составляющей поля менее $-0,1 T$, что соблюдается во многих случаях.

5.2. Конструкция измерительного канала

Схема измерительного канала показана на *рис. 5в*. Подобно усилителю в МПХ-3 входной усилитель /М11, М12/ с ЦВ и калибровочными таблицами обеспечивает измерения полей в диапазоне $/O \div 2/T$ с точностью до $\sim 2 \cdot 10^{-4}$. Результаты отсчитываются в единицах поля $/1 B$ соответствует $1 T$. Режим с компенсацией нелинейности канала задается путем включения тумблера К12 на передней панели прибора. Контакты К12.1 и К12.2 корректируют смещение усилителя и включают реле К13. Контакты реле

подключают вход ДХ через R26, R27 к инвертирующему входу М11 и корректируют усиление ОУ. Точность регистрации полей в этом случае без использования калибровочных кривых достигает $\sim 5 \cdot 10^{-4}$.

Дополнительный каскад на ОУ /М13/ является масштабным усилителем на $10 /1 B$ соответствует $0,1 T$ и обеспечивает диапазон измерения полей $/O - 0,2/T$. В этом диапазоне линейность измерительного канала /*рис. 7*/ достаточно хорошая и специальной коррекции не требуется.

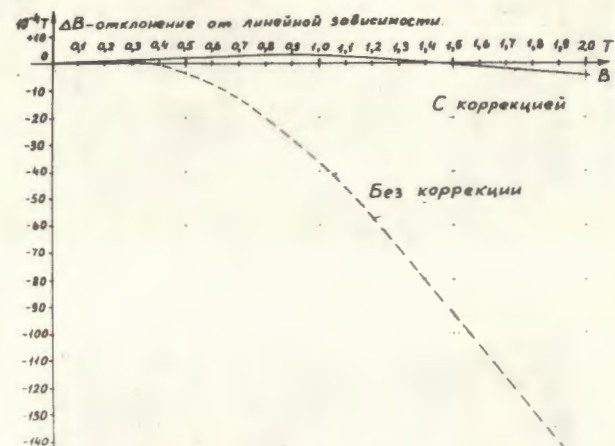


Рис. 7. Характеристики магнитометра при наличии коррекции и без нее.

В магнитометре МПХ-1М пробник с ДХ конструктивно подобен пробникам МПХ-3С. Источник питания выполнен с применением микросхем типа МАА 723 и имеет параметры: $+12 B /1A/$, $-12B/1A/$, $+5B/1,5A/$ при коэффициенте стабилизации более 10^3 и выходных пульсациях не более $0,5 мВ$. Общие габариты магнитометра - $120 \times 220 \times 250 мм^3$, а внешний вид представлен на *рис. 8*. Контроль режима работы МПХ-1М /напряжений питания тока в ДХ, температуры в термостатах/ производится по цифровому табло внутреннего регистратора с помощью клавишного переключателя на передней панели.

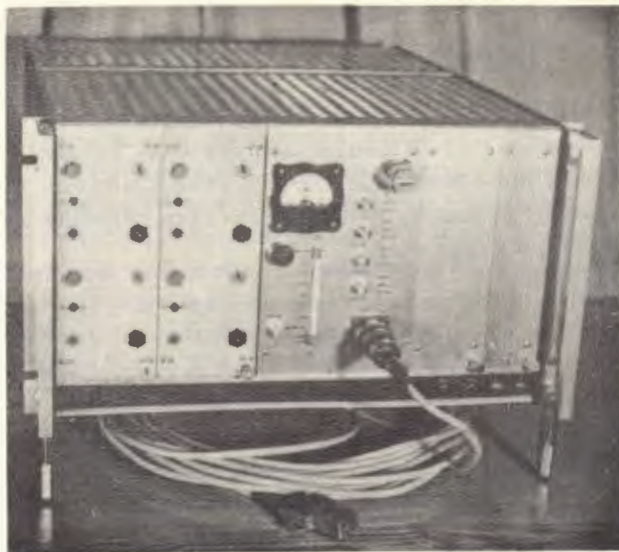


Рис.8. Внешний вид магнитометров МПХ-3/а/ и МПХ-1М/б/.

5.3. Внутренний цифровой регистратор

Цифровой регистратор является измерителем постоянного напряжения в диапазоне ± 2 В с индикацией результатов на цифровом табло в виде четырехразрядного десятичного числа. Регистратор служит в магнитометре для измерения ряда его параметров и для цифровой индикации измеряемых полей в единицах Т с точностью $\sim 10^{-8}$, что делает магнитометр автономным прибором. Схема регистратора представлена на рис. 6. Он включает преобразователь полярности входного напряжения, который состоит из каскада неинвертирующего повторителя на ОУ /М1/, каскада инвертирующего повторителя на ОУ /М2/ ^{8/} и устройства индикации полярности /М3, М8.1, М8.2, Д6/. Преобразователь полярности обеспечивает для последующей схемы сигнал с положительной полярностью, а каскад на М2 позволяет, кроме того, скорректировать расхожимость характеристики ДХ при магнитных полях разного знака.

Преобразователь амплитуда-время сделан по схеме ^{10/} управляемого ждущего мультивибратора с улучшением его термостабильности. JK - триггер /М9/ находится в состоянии 1 и через М5.1 и Д7 поддерживает конденсатор С6 в разряженном состоянии. Триггер запускается по входу С и блокирует свой счетный вход. При этом цепь разряда С6 закрывается, и конденсатор начинает заряжаться стабильным током, который задает схема на Т3, Т4. Напряжение на С6 и базе Т2 линейно возрастает. Измеряемое напряжение подается через термокомпенсирующий повторитель Т1 и Р18 на эмиттер Т2 и определяет момент открывания последнего. В этот же момент открывается и транзистор Т6, замыкая вход S триггера на корпус. При этом триггер и вся схема возвращаются в исходное состояние. Напряжение на входе /0 \pm 2/В линейно управляет длительностью импульса на выходе триггера от -0,3 до 2,3 мс. На элементе М6.1 по сигналу с мультивибратора М10 вычитается начальная часть импульса с триггера, так что на выходе М6.1 импульс изменяется в пределах /0 \pm 2/ мс. Эта длительность преобразуется известным способом в четырехразрядное десятичное число, индицируемое на специальном табло. Схема преобразования состоит из 1-МГц опорного генератора на М7.3, М7.4 и Пэ1,

декадного счетчика на M11 ÷ M14, дешифраторов M15 ÷ M18 и светодиодных индикаторов M19 ÷ M22.

Запуск регистратора осуществляется от сети 50 Гц. Триггер Шмитта M1 и элементы M7.1 и M7.2 формируют импульсы с длительностью 10 мс, которые подаются на одновибратор M10, вырабатывающий сигнал вычитания /установка нуля/ с регулируемой длительностью 150 ÷ 350 мкс. Импульс с длительностью 10 мкс для сброса счетчика и запуска триггера формируется с помощью элементов C4, R16, M5.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В таблице приведены основные параметры рассмотренных выше холловских магнитометров. Использование в этих приборах магнитоизмерительной структуры расширило функциональные возможности магнитометров. Ряд конструктивных и схемных усовершенствований позволил достичь точности измерения ста-

Таблица

Основные параметры магнитометров

№ п/п	Параметр	МПХ-3	МПХ-3С	МПХ-1М
		Значение		
1.	Диапазон измеряемых полей, Т	0-2,5	0-2,5 (5) 0-0,25	0-2 (5) 0-0,2
2.	Точность измерения по ЦВ а. Без коррекции б. С коррекцией по табл.	$2 \cdot 10^{-3}$ $2 \cdot 10^{-4}$	$(3-5) \cdot 10^{-3}$ $(1-2) \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$ $2 \cdot 10^{-4}$
3.	Цифровой регистратор	ЦВ ($\sim 10^{-4}$)	ЦВ ($\sim 10^{-4}$)	ЦВ ($\sim 10^{-4}$) ВнутриЦП
4.	Число каналов измерения	3	3	1
5.	Градиентный канал	есть	есть	нет
6.	Тип датчика Холла	ПХ602	ПХ602	ПХ602
7.	Вариант пробника	Одинс3ДХ	Зотгс1ДХ	Одинс1ДХ
8.	Габариты пробника, мм	12x36x50	10x20x30	8x15x28
9.	Длина кабеля пробника, м	~10	~5	~6
10.	Стабильность температуры в пробнике ($\sim +35^\circ\text{C}$), °С в измерительном блоке ($\sim +45^\circ\text{C}$)	0,1 0,1	0,1 0,1	0,1 0,1
11.	Разогрев прибора, мин	≥ 30	≥ 30	≥ 30
12.	Стабильность тока ($\sim 0,15\text{A}$) ДХ	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
13.	Габариты прибора, мм	Крейт КАМАК	Крейт КАМАК	120x220x250

ционарных магнитных полей до $\sim 10^{-4}$ при наличии удобной цифровой индикации в единицах Т.

Практика эксплуатации магнитометров типа МПХ в различных магнитных системах ОНМУ, ОИЯИ и ИФВЭ в полях до $\sim 2,5$ Т показала высокую стабильность их измерительных каналов, удобство и надежность в работе.

В последнее время в связи с более широким внедрением в измерительную практику микро-ЭВМ на основе микропроцессоров становится реальной возможность включения их в магнитоизмерительные системы с ДХ^{2/}. Это приведет к более полному решению таких проблем, как автоматизация измерений, повышение точности измерений за счет коррекций результатов по нелинейности характеристик ДХ, по планарному эффекту и другим параметрам. При этом прибор останется ограниченным по габаритам /~ крейта КАМАК/ и автономным с возможностью подключения к нему различных внешних устройств регистрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманова Л.Н. и др. ОИЯИ, Р9-10621, Дубна, 1977.
2. Лачинов В.М., Прейзендорф В.А. ОИЯИ, Б1-9-11494, Дубна, 1978.
3. Погодин В.И., Юрьева Г.А. Датчик Холла из антимонида индия. Приборы и системы управления. 1972, 7, с. 15.
4. Runolfsson O. Proc.6th Int.Conf. on Magn. Tech. (MT-6), Bratislava, 1977.
5. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. "Энергия", Л., 1974.
6. Лачинов В.М. Авт.свид. СССР, № 463934. Бюлл. ОИПОТЗ, 1975, 10, с. 103.
7. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 9-9363, Дубна, 1975.
8. Патент ФРГ, № 966524, кл. 21a⁴, 14₀₁, 1957.
9. Лужанский С.М. Авт.свид. СССР № 431475, Бюлл. ОИПОТЗ, 1974, 21, с. 151.
10. Журнал "Радио", 1977, № 5, с. 60.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 июня 1979 года.