

A-954

3382 / 2-77



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

29/III-77

P9 - 10621

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

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА
ДЛЯ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

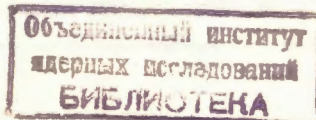
1977

P9 - 10621

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

МАГНИТОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА
ДЛЯ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*Направлено на 5-ое Всесоюзное совещание по проблемам
магнитных измерений /Ленинград, 1977/.*



Ахманова Л.Н. и др.

P9 - 10621

Магнитометрическая аппаратура для коллективного ускорителя
заряженных частиц

Рассматривается методика и аппаратура для измерения стационарных и импульсных магнитных полей со сложным распределением в пространстве и времени. Магнитометр для измерения мгновенных значений магнитных полей до $+2,5$ Т с точностью лучше 10^{-3} используется в измерениях на коллективном ускорителе на линии с ЭВМ. Приведены также магнитометр для измерения коротких по длительности ($\mu\text{с}$) импульсных магнитных полей и магнитометр для измерения стационарных полей.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1977

Akhmanova L.N. et al.

P9 - 10621

Magnetometric Equipment for Collective
Charged Particle Accelerators

The technique and equipment for measurement of stationary and pulsed magnetic fields with a complex time and space distribution is considered. A magnetometer intended for measurement of instantaneous values of magnetic fields up to 2.5 T with the accuracy better than 10^{-3} is used at collective accelerator on-line with computer. There were considered also the magnetometer for short (μs) pulsed magnetic field measurements and the magnetometer for stationary field measurements.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1977

Создание коллективного ускорителя /1-4,17/ ставит специфические требования к магнитометрической аппаратуре, которая используется для измерения и формирования магнитных полей во всех основных его узлах /силунд, адгезатор, кольцетрон/, и в ряде других экспериментальных установок. Получение сильноточного пучка электронов малой длительности, формирование и сжатие электронного кольца, вывод и ускорение кольца с ионным наполнением - все эти процессы в коллективном ускорителе осуществляются с использованием соответствующих магнитных полей. Необходимо измерять поля, а часто и их градиенты, как стационарные, так и переменные-импульсные. Величины магнитных полей лежат обычно в диапазоне $0,01-2,5$ Т, а длительности импульсных полей - от $\mu\text{с}$ до мс . Количество измерений подчас достигает более десятков тысяч значений, так как измерения проводятся в достаточно больших пространствах, а также во времени /например, при измерении и формировании n -траектории сжимаемого электронного кольца в адгезаторе УТИ⁹//. Поэтому нужна максимальная автоматизация работы измерительной аппаратуры, систем механического привода датчиков и возможность их работы на линии с ЭВМ с целью более оперативного управления аппаратурой и соответствующей обработки результатов измерений и представления их в удобной форме. Однако в ряде случаев при сравнительно небольших количествах измерений аппаратура должна функционировать в автономном режиме с ручным управлением.

Наряду с этим, например, в адгезаторе и кольцетроне, требуется точность определения относительных и абсолютных значений магнитных полей /включая их мгновенные значения в разные моменты времени/ до $0,1 \pm 0,01\%$, а их градиентов - до 1% .

С учетом указанных выше требований была создана соответствующая магнитометрическая аппаратура. Наиболее широкое применение нашла методика измерения мгновенных значений магнитных полей. Эта методика достаточно универсальна, так как позволяет измерять пространственные и временные распределения переменных импульсных магнитных полей и их градиентов, как и комбинации их со стационарными, при временной привязке измерителя к какому-либо моменту динамического процесса. Возможность измерения стационарных полей при такой методике весьма упрощает проведение высокоточной калибровки аппаратуры по ЯМР-измерителю в однородном стабильном стационарном поле. Таким образом, эта методика может обеспечить высокую относительную и абсолютную точность измерений. При малых значениях "мгновенности" измерений и высокой стабильности временной привязки эта методика обеспечивает хорошее временное разрешение, а при наличии эффективного подавления индукционных наводок в аппаратуре - увеличение точности измерения более быстропеременных полей.

В практике магнитных измерений на коллективном ускорителе нашли применение и другие более ограниченные методики измерения магнитных полей - это метод с преобразованием частотного спектра измеряемого сигнала для очень быстрых импульсных полей, а также система многоканального измерения стационарных магнитных полей и их градиентов с повышенной точностью.

Все рассмотренные ниже магнитометры, основанные на разных методиках, объединены тем, что в качестве магниточувствительного элемента для них выбран датчик Холла /ДХ/. Его известное быстроедействие, малые размеры, чувствительность к направлению магнитного поля, работа в широком диапазоне полей и достигнутая в последнее время высокая стабильность параметров -

делают ДХ особенно необходимым для указанных методик. Наиболее высокоточные ДХ из антимонида индия ^{/5/}, которые теперь у нас используются, имеют размер $1,6 \times 0,5 \times 13$ мм. Входное и выходное сопротивления - ~ 2 Ом, чувствительность - $\sim 10^2$ мВ/Т при номинальном токе питания 100 мА, ТКН датчика Холла менее $0,01\%/C$. Линейность характеристики ДХ в диапазоне полей до $2,5$ Т достигает $\sim 0,1\%$.

Применение в магнитометрах современных интегральных операционных усилителей /например, IUT401/ с дифференциальным входом позволило получить широкополосные, стабильные и линейные измерительные каналы.

На рис. 1 представлена блок-схема одного измерительного канала магнитометра для измерения мгновенных значений полей МИХ-2 ^{/6/}. Так как чувствительность ДХ относительно мала, то, чтобы снизить погрешность измерения из-за наводок, дрейфа и шумов усилителя в измерительном канале, чувствительность ДХ повышена до $\sim 10^3$ мВ/Т за счет питания его импульсным током ~ 10 мкс и с амплитудой $1 \div 2$ А, превышающей в $10 \div 20$ раз номинальный ток, ограниченный перегревом ДХ ^{/6/}. Кроме того, для подавления различного вида наводок и дрейфа в измерительном канале еще применены бифилярная скрутка и укладка подводов к ДХ, разные экраны, активные и пассивные фильтры, схемные спосо-

бы.

Питание ДХ осуществляется от источника постоянного тока со стабильностью, лучшей $0,01\%$, который подсоединен к входу ДХ через конденсатор С, а параллельно выходу источника подключен транзисторный токовый ключ, запирающийся на время питания ДХ импульсом модуляции от хронизатора. Конденсатор С предохраняет ДХ от длительного протекания через него повышенного тока и обеспечивает нулевой начальный ток через ДХ, хотя на ключе есть остаточное напряжение ^{/19/}.

Частота повторения импульсов возможна до ~ 1 кГц.

Запускающий импульс /рис. 1/ жестко привязан по времени к измеряемому импульсу магнитного поля /рис. 2, а и б/. При автономной работе магнитометра формирователь вырабатывает импульсы разового пуска и периодические с частотой 50 Гц. Импульсы с формирователя

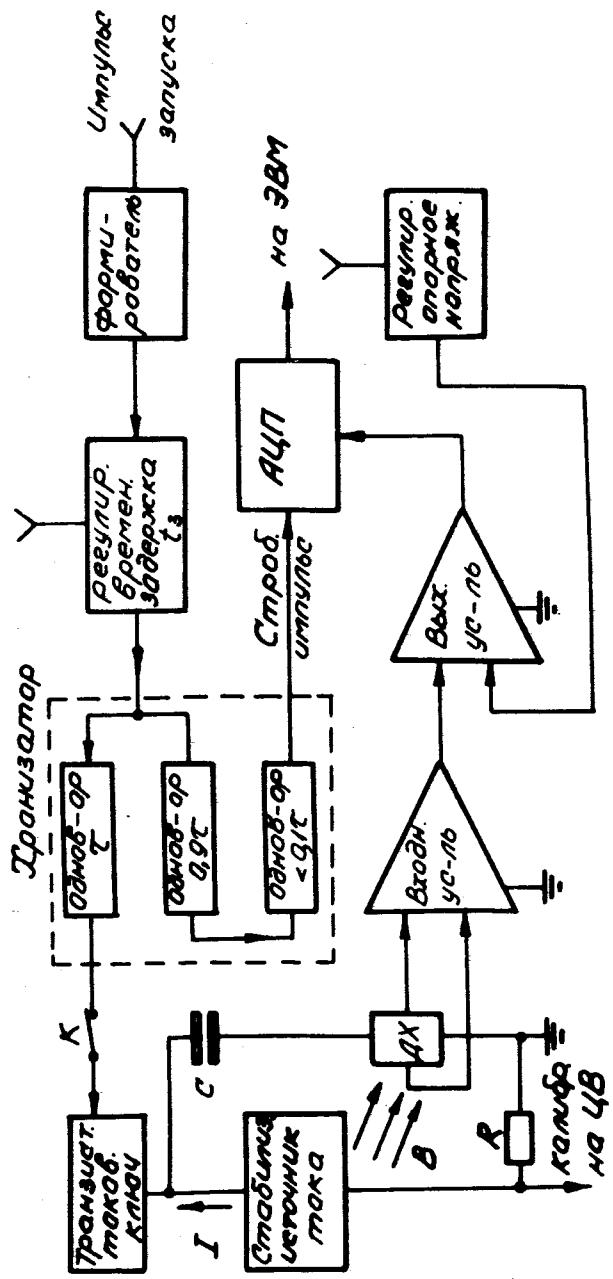


Рис. 1. Блок-схема одного измерительного канала МИХ-2.

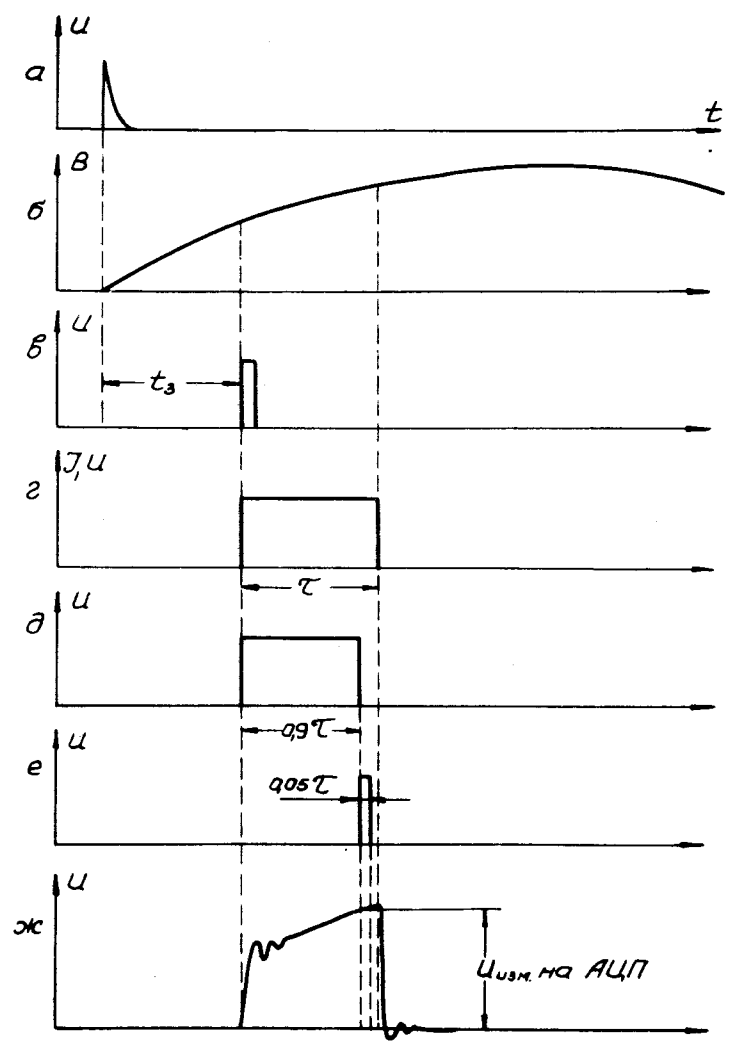


Рис. 2. Временные диаграммы магнитометра МИХ-2.

задерживаются на время t_3 /рис. 2,в/ в блоке цифровой управляемой вручную или от ЭВМ задержки с шагом 0,1 мкс и обеспечивают измерения полей в разные моменты времени. Задержанный импульс поступает в хронизатор. Он запускает первый одновибратор, вырабатывающий импульс модуляции /рис.2г/ с длительностью τ ,

и второй одновибратор, вырабатывающий импульс /рис. 2д/ длительностью $\sim 0,9\tau$. Последний спадом запускает третий одновибратор, обеспечивающий строб-импульс /рис. 2е/ длительностью $< 0,1\tau$.

Измеряемый импульс с ДХ после усиления попадает на вход регистрирующего аналого-цифрового преобразователя /АЦП/ /рис. 1/. Момент измерения определяется строб-импульсом, положение которого соответствует конечной части измеряемого импульса /рис. 2ж/, где нет переходных процессов. Мгновенное значение /в пределах 1 мкс/ измеряемого сигнала регистрируется в цифровом виде в блоке АЦП с 1024 каналами, имеющего выход на ЭВМ.

Источник регулируемого опорного напряжения позволяет задавать на входе регистратора различные уровни и полярности смещения /пьедестала/. Это дает возможность работать магнитометру в различных режимах - повышать разрешение регистратора, изменять диапазон измеряемых полей, измерять положительные, отрицательные и малые магнитные поля.

Магнитометр МИХ-2 имеет два измерительных канала, которые функционируют самостоятельно с отдельными для адгезатора и силунда пробниками и в комбинации - для измерения градиентов полей со специальными пробниками. В пробниках ДХ могут поворачиваться на 90° . В случае измерения градиентов осуществляется следующая схема соединения двух ДХ и измерительных каналов /8/ /рис. 3/. Оба ДХ питаются последовательно от одного стабилизатора тока, что способствует повышению точности измерения. Согласование по постоянному току выходных цепей ДХ реализуется двумя усилителями с дифференциальными входами, которые нечувствительны к синфазным сигналам и позволяют легко выравнивать чувствительность каналов. Сигнал градиента магнитного поля, в котором расположены ДХ с интервалом в 1 см, получается при помощи дополнительного усилителя ОУ₃.

Все пробники с ДХ соединяются с входными блоками кабелем длиной до 10 м, а входные блоки соединяются кабелем 50 м с регистрационно-управляющими блоками, которые выполнены в совмещенном стандарте

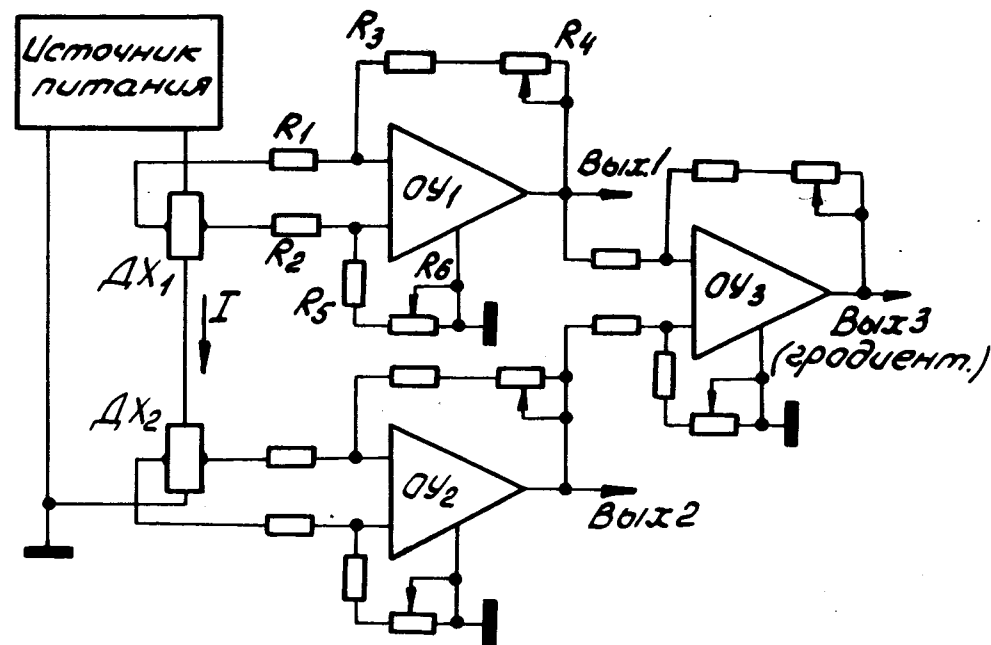


Рис. 3. Упрощенная схема измерения градиентов магнитных полей в МИХ и в МПХ.

ВИШНЯ-КАМАК с возможностью включения в систему ЭВМ М-6000.

Диапазон измеряемых полей /с 6 поддиапазонами/ - до 2,5 Т. Общую относительную погрешность измерения магнитных полей B_x , для МИХ-2 можно оценить по следующей формуле:

$$\delta_{\text{отн}} = \left(0,05 + \frac{10^{-3}}{B_x} + \frac{100}{N_{\text{КХ}} \pm N_{\text{К СМ}}} \right) \% \quad /1/$$

Первые две составляющие $\delta_{\text{отн}}$ определяются в основном температурными изменениями параметров ДХ, стабильностью тока питания ДХ, дрейфом и шумом усилителей. Указанные значения достигаются после прогрева прибора и в интервале изменения внешней температуры $< \pm 5^\circ\text{C}$. Последняя составляющая является погрешностью дискретности АЦП. Она уменьшается в два раза при

введении отрицательного смещения на входе АЦП - $N_{\text{КСМ}} = U_{\text{СМ}} / 5$ мВ. Точные величины абсолютных значений магнитных полей находятся по градуировочным графикам или таблицам, а при работе на линии с ЭВМ последние вводятся в память ЭВМ.

Так как обычно система импульсного питания катушек различных магнитных систем ускорителя недостаточно стабильна, то для снижения влияния этой нестабильности на точность измерения распределения полей либо увеличивают статистику измерений, либо с помощью второго канала осуществляют относительные измерения, либо измеряют непосредственно градиент поля, когда это допустимо. Последний режим дает дополнительное преимущество по точности измерений

/например, определение $n = -\frac{R}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial R}$ - показателя спада

поля в адгезаторе/ в связи с погрешностями механической установки пробника в пространстве.

Нужно заметить, что при снятии пространственных распределений магнитных полей часто точность механического привода пробника определяет достигаемую точность измерения топографии поля. Поэтому в ряде случаев приходится создавать весьма громоздкие механические системы с автоматизированным управлением, чтобы обеспечить требуемую точность и скорость измерений. Так, было проведено несколько сеансов измерений и формирования магнитного поля на линии с ЭВМ в системе сжатия электронного кольца в адгезаторе ускорителя тяжелых ионов^{/9/} с использованием МИХ-2 и специальной системы автоматизированного привода^{/10/}. ЭВМ регистрировала и задавала режим измерения - поддиапазон с калибровочной таблицей, координаты датчика, время задержки t_3 , статистику измерений, параметры полей, коэффициент спада и распечатывала всю информацию в виде таблиц. В результате многодневных измерений было сформировано нужное магнитное поле адгезатора УТИ.

Кроме того, в процессе предварительных экспериментальных работ по созданию адгезатора с помощью МИХ-2 проведены исследования экранирования переменного маг-

нитного поля проводящими экранами^{/11/}, измерения искажений импульсных магнитных полей в камере адгезатора^{/7/} и другие^{/12/}.

Последующее усовершенствование магнитометра^{/13,18/} снизило погрешность измерения^{/13/}. Во-первых, было практически устранено влияние температурного и временного дрейфа усилителей, что снижает соответствующие требования к усилителям, особенно при измерениях в диапазоне малых магнитных полей. Во-вторых, осуществлено значительное подавление различных наводок в измерительном канале в полосе до 10 кГц. Кроме того, была автоматизирована установка и стабилизировано выходное смещение измерительного тракта. На рис. 4б показана схема усовершенствованного измерительного канала с охватом выходного усилителя отрицательной запаздывающей обратной связью^{/13,18/}, которая не влияет на измеряемый сигнал и на частоту его повторения, а выполняет указанные выше функции. В схему введены усилители U_4 и U_5 и линия задержки ЛЗ на время, большее τ , которое равно 4 мкс. С помощью U_5 сравниваются выходное смещение $U_{\text{СМ}}$ измерительного канала / U_1 , U_2 , U_3 / и опорное регулируемое напряжение $U_{\text{оп}}$. Сигнал ошибки через ЛЗ поступает на неинверсный вход U_4 , выход которого подключен к инверсному входу U_3 . Таким образом, осуществляется обратная связь для поддержания $U_{\text{СМ}}$, равным $U_{\text{оп}}$. Коэффициент стабилизации этого устройства более 1000 в диапазоне частот до 200 Гц, ~200 при 1 кГц и ~5 при 10 кГц. $U_{\text{СМ}}$ устанавливается вручную или автоматически от ЭВМ по шинам записи в пределах ± 5 В. Статическая ошибка регулирования устраняется введением связи между $U_{\text{оп}}$ и инверсным входом U_4 через делитель $R_{10}-R_{11}$. Сигнал обратной связи задержан на время, большее τ , и начинает воздействовать на $U_{\text{из}}$, когда измерение последнего закончено /рис. 4а/.

Желательно повышение быстродействия обратной связи для расширения диапазона частот измеряемых полей свыше 10 кГц и для снижения требований к применяемым в измерительном канале способам подавления наводок. Это возможно за счет уменьшения величины $\tau(t_3)$ и введения коррекции.

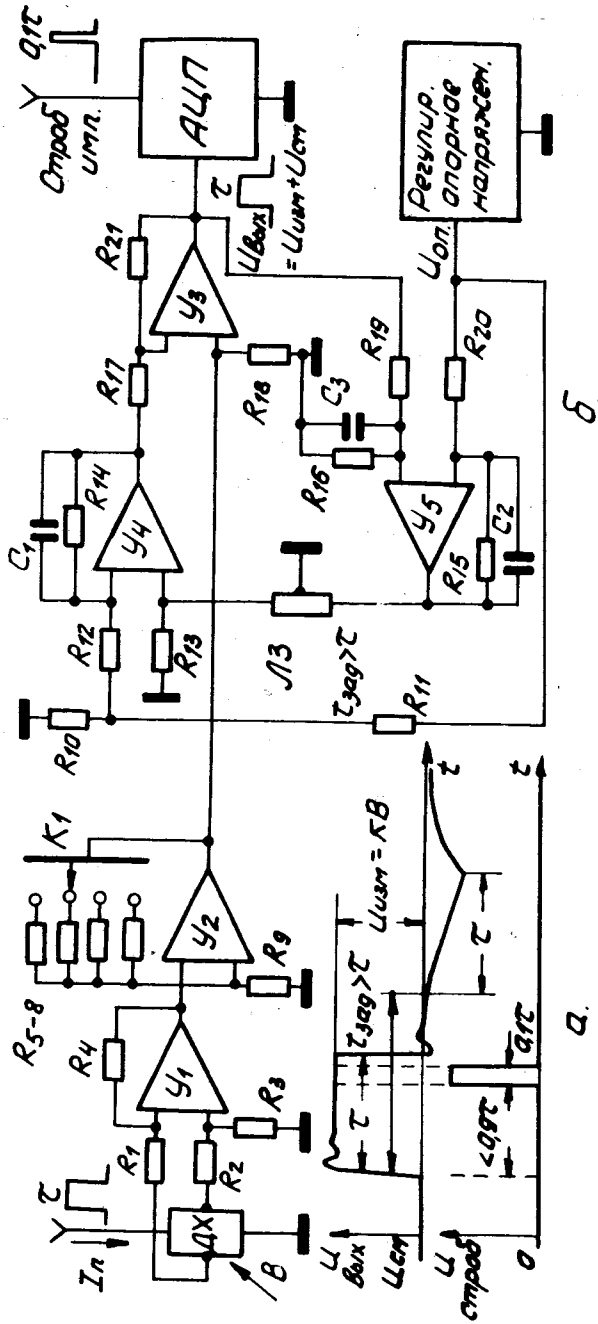


Рис. 4. Усовершенствованная схема измерительного канала МИХ.

Блоки новой выходной части магнитометра выполнены в стандарте КАМАК и могут работать как в автономном режиме, так и на линии с ЭВМ. Для снижения погрешности от дискретности регистратора разработан АЦП на 4096 каналов. С введением термостабилизации ДХ в пробнике относительная точность измерения /МИХ-3/ достигнет $\sim 2 \div 4 \cdot 10^{-4}$ для магнитных полей свыше 0,02 Т в диапазоне частот до 10 кГц.

Для коррекции траектории электронного пучка в ускорителе используются импульсные магнитные поля \sim до 0,05 Т/ с длительностями и фронтами до долей мкс. Для измерения таких полей нужен широкополосный магнитометр, но со сравнительно невысокой точностью. Наибольшие погрешности в измерениях здесь вносят индукционные наводки, устранение влияния которых и достигается в разработанном у нас макете широкополосного холловского магнитометра /ШХМ/ с полосой до 10 МГц. В нем осуществлен метод ^{14/} смещения частотного спектра измеряемого сигнала в в.ч. область посредством введения вспомогательной несущей частоты, которая значительно превышает верхнюю граничную частоту спектра сигнала и помех, а реализуется при питании ДХ током с частотой 50 МГц. С помощью ДХ, являющегося преобразователем, смещается частотный спектр сигнала, тогда как спектр помехи не изменяется и сигнал помехи легко отфильтровывается.

Блок-схема ШХМ-1 показана на рис. 5. Питается ДХ от задающего генератора через усилитель мощности тока 0,1 А, 50 МГц. Измеряемый сигнал с выхода ДХ от магнитного поля В модулирован с частотой 50 МГц. Фильтр высоких частот не пропускает сигналов индукционных наводок на ДХ и подводящие провода, а несущая частота с боковой полосой частот от сигнала проходят через этот и дополнительный полосовый фильтры на вход дифференциального в.ч. усилителя. Радиочастотный сигнал после полосового /50÷60/ МГц усилителя поступает на амплитудный детектор, с которого сигнал, подобный импульсу поля В, регистрируется на экране осциллографа с памятью. Точность измерения поля В в диапазоне до /0,02÷0,05/ Т достигает /5÷10/ %.

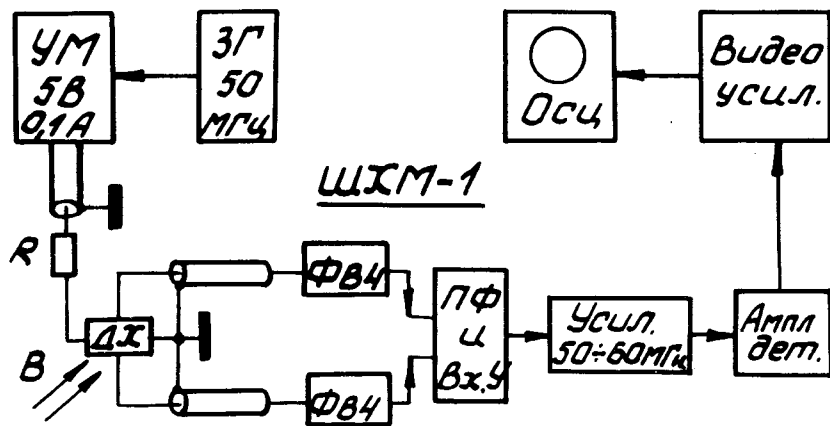


Рис. 5. Блок-схема широкополосного холловского магнитометра ШХМ-1.

Магнитометр может измерять и постоянные магнитные поля и калиброваться с их помощью. Применив дополнительно в качестве регистратора АЦП, можно заметно повысить точность измерения.

В сверхпроводящей в.ч. секции коллективного ускорителя /кольцетрон/ ^{2,15,16/} используется стационарное пилообразное магнитное поле с максимальным значением ~ 2 Т и с $5 \div 10\%$ -ной модуляцией на длине ~ 2 м с периодом 45 см. Поле поддерживает вращательное движение электронов в ускоряемом кольце и "плавность" продольного ускорения этих колец. Измерение и формирование нужного поля проводится в центральной трубе кольцетрона вдоль его оси на радиусах до 5 см. Для измерения этого поля создан специальный холловский магнитометр /МПХ/ с тремя измерительными и одним градиентным каналами согласно упрощенной схеме на рис. 3. Выбирая одну из пар измерительных каналов, можно измерять градиент поля либо вдоль оси кольцетрона, либо по радиусу.

Пробник с ДХ располагается в передвижной головке, которая теплоизолирована от корпуса криостата кольцетрона. Кроме того, пробник имеет индивидуальную

систему термостабилизации с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$, а с наружной стороны он обдувается потоком воздуха комнатной температуры. С помощью моторного привода пробник передвигается по оси и поворачивается на 360° .

Измерительная схема магнитометра термостабилизирована, ток питания ДХ $\sim 0,1$ А/ стабилизирован с точностью, лучшей $0,01\%$. Отсчет показаний производится по цифровому вольтметру, точность которого лучше $0,01\%$, непосредственно в единицах поля с последующим выходом на цифropечать. МПХ после предварительного прогрева обеспечивает измерения постоянных магнитных полей до $\sim 2,5$ Т с относительной точностью, лучшей $\sim 0,02\%$. Абсолютные значения полей определяются с точностью $\sim 0,1\%$ либо более точно по градуировочным кривым, которые получены при калибровке по ЯМР магнитометру. Проведено несколько сеансов измерений на кольцетроне ^{15,16/}.

В переходной области между адгезатором и кольцетроном, а также в случае ускорителя тяжелых ионов, между выходной ступенью обмотки адгезатора и сверхпроводящей ускоряющей секцией ^{17/} прохождение электронного кольца поддерживается комбинацией импульсного и стационарного магнитных полей. В этом случае измерение и формирование требуемого распределения поля производится магнитометром типа МИХ.

Литература

1. Барабаш Л.С. и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
2. Анищенко Н.Г. и др. ОИЯИ, Р9-4722, Дубна, 1969.
3. Агеев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-9363, Дубна, 1975.
4. Беллев А.П. и др. ОИЯИ, 9-8289, Дубна, 1975.
5. Погодин В.И., Юрьева Г.А. Датчик Холла из антимонида индия. Приборы и системы управления, 1972, 7, с.15.
6. Лачинов В.М., Маковеев В.К. ОИЯИ, Р9-8118, Дубна, 1974; ПТЭ, 1975, №3, с.170.
7. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-7778, Дубна, 1974.
8. Лачинов В.М. Авторское свидетельство №463934, Бюлл. ОИПОТЗ №10, 1975, с.103.
9. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-8753, Дубна, 1975.

10. Комогорова Л.В. и др. ОИЯИ, 9-9586, Дубна, 1976.
11. Дерендяев Ю.С. и др. ОИЯИ, Р9-8486, Дубна, 1974.
12. Жабицкий В.М. и др. ОИЯИ, Р9-7679, Дубна, 1974.
13. Лачинов В.М., Маковеев В.К. ОИЯИ, Р9-9899, Дубна, 1976.
14. Бабенко Н.С. Метод измерения импульсных магнитных полей датчиком Холла. Автометрия, 1971, №2, с.73.
15. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 9-9363, Дубна, 1975.
16. Агеев А.И. и др. ОИЯИ, 9-9379, Дубна, 1975.
17. Дерендяев Ю.С. ОИЯИ, Р9-8317, Дубна, 1975.
18. Лачинов В.М. Авторское свидетельство №530291, Бюлл. ОИПОТЗ №36, 1976, с.110.
19. Лачинов В.М., Маковеев В.К. Авт. свид. №559199. Бюлл. ОИПОТЗ №19, 1977, с.127.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 апреля 1977 года.