

4048

Энз. чит. зала



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

13 - 4048

Ю.Н.Денисов

ИЗМЕРЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ
СТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

(специальность 260 - приборы экспериментальной физики)

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Дубна 1968

Ю.Н.Денисов

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук А.А.Васильев

доктор технических наук Л.П.Зиновьев

доктор технических наук В.С.Павасюк

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт ядерной физики СО АН СССР.

Автореферат разослан " " 1988 г.

Защита диссертации состоится " " 1988 г. на заседании Ученого Совета Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

О.А.Займидорога

ИЗМЕРЕНИЕ И СТАБИЛИЗАЦИЯ СТАЦИОНАРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

(специальность 260 - приборы экспериментальной физики)

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

В современной экспериментальной ядерной физике широко применяются различные приборы и установки со стационарными магнитными полями. В зависимости от типа и назначения устройства параметры используемых магнитных полей и требования к точности реализации заданного закона распределения поля меняются в очень широких пределах. Далеко не во всех случаях требуемая конфигурация полюсов магнита и распределение возбуждающих токов в обмотках могут быть определены аналитически. Формирование магнитных полей циклических ускорителей заряженных частиц, сепараторов, спектрометров, трековых камер и ряда других приборов производится обычно методом последовательной коррекции элементов магнитной системы по результатам измерения параметров поля — абсолютной величины магнитной индукции, компонент поля, градиента, гармонического состава функции распределения поля и т.д. Для получения необходимой информации о формируемом поле в процессе сооружения физических установок и для поддержания заданных параметров их магнитных систем в процессе эксплуатации необходим комплекс измерительных и стабилизационных систем и приборов, позволяющих с высокой точностью ($\pm 0,01\%$) измерять как однородные, так и очень неоднородные (с градиентом до $10 \pm 50\%$ от абсолютной величины поля) магнитные поля с индукциями от нескольких миллитесла до 2 ± 3 тл, производить математическую обработку результатов измерений и стабилизировать заданные значения полей с точностью $0,01 \pm 0,001\%$ в течение длительного времени. Описанию таких приборов и устройств, раз-

работанных в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований и посвящена реферируемая диссертация.

Диссертация состоит из шести разделов. В первом разделе описывается несколько типов ядерных магнитометров, предназначенных для лабораторных измерений абсолютных величин однородных и существенно неоднородных магнитных полей с точностью $\sim 0,01\%$, соответствующей стандартным требованиям большинства прецизионных магнитных систем, используемых в экспериментальной ядерной физике. Второй раздел посвящен описанию трех типов широкодиапазонных автоматических электронно-счетных частотомеров с максимальными скоростями счета до 100 Мгц. Эти частотомеры особенно удобны для измерения частоты автодинных детекторов ядерного и электронного магнитного резонанса. В третьем разделе рассматриваются магнитометры, предназначенные для прецизионного измерения относительно малых (меньших 10 мТл) магнитных полей. Магнитометры с полупроводниковыми датчиками ряда типов описываются в четвертом разделе. Пятый раздел диссертации посвящен методам математической обработки результатов магнитных измерений при помощи специализированных цифровых и аналоговых вычислительных устройств. В шестом разделе описывается несколько типов стабилизаторов поля и тока возбуждения электромагнитов со стационарными полями.

I. Ядерные магнитометры

В настоящее время ядерные магнитометры получают все большее и большее распространение как наиболее удобные приборы, позволяющие с высокой точностью измерять абсолютную величину стационарных магнитных полей в диапазоне от 10^{-5} до $2 \cdot 5$ тл. Разработан и описан ряд как лабораторных, так и промышленных образцов ядерных магнитометров, применяющихся или как образцовые, поверочные приборы, по которым калибруются магнитометры, использующие относительные методы измерений, либо непосредственно, как измерители магнитных полей в различных установках. Однако широкий диапазон задач, решаемых с помощью этих приборов, и, как следствие, разнообразие требований, предъявляемых к измерителям магнитного поля различными частными условиями эксплуатации, обуславливает необходимость дальнейших разработок новых модификаций магнитометров, основанных на этом принципе измерений. В частности, при разработке и сооружении циклических ускорителей заряженных частиц необходимо с высокой точностью ($10^{-2} + 10^{-3}\%$) измерять как относительно однородные, так и очень неоднородные магнитные поля в электромагнитах с диаметром полюсных наконечников, достигающим $5 \cdot 10$ метров. Такие специфические условия использования налагают особые требования на блок-схему, способ детектирования ядерного магнитного резонанса и конструкцию ядерных магнитометров.

Из известных методов детектирования сигналов ядерного магнитного резонанса (ЯМР), сущность каждого из которых достаточно подробно описана в ряде работ /1,2,3/, для целей измерения

магнитного поля в широком диапазоне значений наиболее удобным является автодинный метод. Основным, решающим преимуществом этого метода перед другими способами детектирования является простота перестройки генерируемой частоты в широком диапазоне значений. В автодине это делается только одним органом, обычно конденсатором в резонансной контуре. Во всех других способах при изменении частоты необходимо регулировать несколько элементов схемы. Кроме того, при автодинном способе детектирования регистрируется только мнимая часть χ'' комплексной ядерной магнитной восприимчивости χ , характеризующая поглощение высокочастотной энергии образцом, помещенным в поле катушки индуктивности резонансного контура автодина. Резонансный сигнал в этом случае получается однополярным и симметричным, что облегчает фиксацию частоты или магнитного поля, соответствующего моменту точного резонанса.

Некоторым недостатком автодинного детектора ЯМР является трудность получения очень малых радиочастотных полей H_1 , необходимых для того, чтобы избежать насыщения образцов с большими продольными временами релаксации T_1 , или относительно сильных полей H_1 , применяемых при наблюдении очень малых времен релаксаций. Однако в случае использования автодинных детекторов ЯМР в магнитометрах этот недостаток не имеет существенного значения, поскольку практически всегда имеется возможность подобрать рабочее вещество с такими релаксационными временами T_1 и T_2 , для которых диапазон создаваемых автодинном радиочастотных полей H_1 является оптимальным.

При выборе конкретной схемы автодинного детектора ЯМР в магнитометрах трудно аналитически точно обосновать преимущества какой-либо определенной схемы автогенератора применительно к такому характеру его использования. Обычно при выборе схемы необходимо учитывать целый ряд иногда противоречивых условий и соображений как общего, так и частного характера. Поэтому на начальном этапе развития конструкций ядерных магнитометров были опробованы в различных образцах приборов почти все известные типы схем автодинов. Однако постепенно в результате сравнения характеристик многих ядерных магнитометров были отобраны как наиболее подходящие две схемы автодинов - двухламповая схема генератора с катодной связью и емкостная трехточка. Из этих двух типов схем, по-видимому, как по величине отношения сигнал/шум при регистрации резонансной линии ЯМР, так и по ряду конструктивных соображений некоторое предпочтение должно быть отдано емкостной трехточке. Эта схема и была использована в ядерных магнитометрах, разработанных в лаборатории. В последнее время обращено внимание на схему автодина с функционально выделенным усилителем-ограничителем высокочастотных колебаний.

В диссертации рассмотрена работа автодина типа "емкостная трехточка" с учетом специфики его использования как детектора сигналов ЯМР. Проведен анализ влияния параметров схемы на величину резонансного сигнала.

Вторым важным вопросом, который обычно должен решаться одновременно с подбором оптимальной схемы автодина, является выбор способа детектирования высокочастотного напряжения на контуре генератора. Для этого принципиально может использовать-

ся любой из известных способов детектирования. Некоторое предпочтение, по-видимому, следует отдать анодному детектору. В этом случае оказывается возможным совместить функции автодина и детектора в одной лампе. Следовательно, в схему не вводится дополнительных источников шумов и таким образом достигается выигрыш в отношении сигнал/шум. Рассмотрен режим работы детектора, совмещенного с автодином. Из-за сильной обратной связи за счет катодного сопротивления характеристики автодинно-детекторной лампы существенно линеаризуются, и во всем обычно используемом диапазоне высокочастотных напряжений на контуре режим детектора, оказывается, может рассматриваться как режим малых сигналов. Величина резонансного сигнала на выходе детектора равна

$$U_c = \frac{2\eta \eta_0 \omega_0^2 T_2 (C_2 + C_c) R_H R_{i0} S_0'}{S_2 [R_H + R_{i0} + R_c (1 + \frac{1}{2} S_0' R_{i0} Q_0)] (1 + \gamma^2 \xi^2 Q_0^2 T_1 T_2)} \quad (I)$$

где η - коэффициент заполнения образцом объема магнитного поля контурной катушки; η_0 - статическая магнитная восприимчивость спиновой системы образца; $\omega_0 = \gamma B_0$ - ларморовская частота прецессии; T_1 и T_2 - продольное и поперечное времена релаксации; $\xi = \frac{H_1}{Q_0}$ - коэффициент пропорциональности между напряженностью высокочастотного возбуждающего поля и амплитудой напряжения на контуре автодина; C_2 , C_c , R_H , R_{i0} , S_0' , S_2 , R_c - параметры схемы автодина. Как следует из выражения (I), величина сигнала пропорциональна γ^2 , поэтому во всех рассматриваемых в диссертации ядерных магнитометрах регистрируется ЯМР протонов, для которых γ

практически максимальна (больше она только у трития). Применение других ядер, таких как Li^7 или d (дейтерий), приводит к значительному ухудшению отношения сигнал/шум, для Li^7 в 6,5 раз, а для d в 40 раз. В качестве протонсодержащего вещества используется вода с добавкой в раствор определенных количеств парамагнитных ионов Fe^{+++} для подбора оптимальных величин релаксационных времен T_1 и T_2 . При измерении неоднородных магнитных полей концентрация Fe^{+++} берется равной $\sim 10^{21}$ 1/см³.

При выборе параметров схемы и способов регулирования уровня генерации автодина были приняты необходимые меры для стабилизации режима детектирования сигнала ЯМР при перестройке частоты как внутри каждого поддиапазона, так и во всем диапазоне измеряемых полей до 2,5 тл. Применена параметрическая стабилизация за счет R_c и переходной емкости в цепи емкостного делителя и активная схема регулирования уровня возбуждения, воздействующая на величину анодного напряжения генераторной лампы.

На основе рассмотренного автодинного детектора ЯМР было разработано несколько типов ядерных магнитометров, характеристики которых трансформировались в соответствии с определенными требованиями, возникавшими в практике разработки магнитных систем для ряда приборов экспериментальной ядерной физики. Для измерения полей в больших электромагнитах с диаметром полюсов, достигающим нескольких метров, разработаны магнитометры с автодинным детектором, размещенным в блоке-датчике, который может быть внесен непосредственно в измеряемое поле /4/.

Частота и уровень генерации автодина регулируются дистанционно. В двух модификациях этого прибора применяются или специальный двоянный цилиндрический конденсатор с электромеханическим приводом, либо варикапы. Полный диапазон индукций, измеряемых приборами, составляет 42 мтл+2,5 тл. Допустимая неоднородность магнитного поля $\sim 1\%/см$. Точность измерений не хуже 0,01%. Датчик может быть отнесен от магнитометра на десятки метров. Минимальная величина зазора в измеряемых магнитах должна быть не менее 16+22 мм. Для магнитов с диаметром полюсных наконечников не более 30 см зазор может быть уменьшен до 5 мм.

При разработке магнитометров ЯМ-1 и ЯМ-2 особое внимание было уделено их конструктивному исполнению, технологичности, воспроизводимости характеристик как отдельных блоков, так и приборов в целом. С этой целью было изготовлено и испытано несколько модификаций датчиков и блоков индукции, а затем выбраны наиболее удачные образцы. Таким образом, удалось в значительной степени избежать обычной "болезни" лабораторных установок - уникальности, неповторимости их характеристик при копировании и организовать в центральных экспериментальных мастерских (ЦЭМ) Объединенного института ядерных исследований серийное производство ядерных магнитометров ЯМ-1 и ЯМ-2.

На протяжении нескольких лет в лаборатории велись работы, направленные на радикальное расширение возможностей ядерных магнитометров с целью их использования

для прецизионных измерений сильно неоднородных магнитных полей. В результате этих работ было показано, что допустимая величина градиента измеряемого магнитного поля может быть значительно увеличена, если неоднородность магнитного поля в объеме ампулы с рабочим веществом компенсировать при помощи дополнительного магнитного поля с градиентом, противоположным по направлению и равным по величине градиенту измеряемого поля. Причем напряженность магнитного поля, соответствующая центру ампулы с рабочим веществом, должна оставаться неизменной ^{15/}. Такое компенсирующее поле квадрупольного типа может быть создано при помощи двух или четырех проводников с током, имеющих строго определенную форму и размеры. На рис. 1 показаны два типа токовых квадруполей, используемых в датчиках магнитометра. В диссертации приведены выражения для градиента, создаваемого этими квадруполями, в зависимости от соотношения их характерных размеров и тока. Найдены оптимальные соотношения размеров, обеспечивающие максимальный объем компенсирующего поля с постоянным градиентом. Например, градиент в центре квадруполя, показанного на рис. 1, равен

$$\frac{dB_z}{dx} \Big|_{z=0}^{z=0} = \frac{8 \cdot 10^{-7} I \ell \mu \beta}{a^2 \alpha (\beta^2 - 1)} \cdot \sin \alpha_0 \quad (2)$$

При реальных размерах и допустимой плотности тока градиент в центре этого квадруполя достигает 0,1 тл/см, а при импульсном питании - 0,35-0,4 тл/см. Рассматриваемый метод измерения неоднородных магнитных полей и был применен в ядерном магнитометре ЯМ-3. Датчик этого прибора имеет специальную конструкцию

со встроенным в сменные головки компенсирующим квадруполем.

Градиент в центре квадруполя равен

$$\frac{dB_z}{dx} \Big|_{z=0} = 0,54 I_E \tau^2 / \mu$$

Система питания обеспечивает импульсы тока I_E до 80-100 а.

На рис.2 показан резонансный сигнал, полученный при оптимальной компенсации в магнитном поле 1 тл с градиентом 0,4 тл/см. Ширина сигнала ЯМР в этом случае составляла 0,8 мтл, а точность измерений ~0,01%.

Измерив ток квадруполя при оптимальной компенсации, можно по формуле (2) вычислить и величину градиента измеряемого магнитного поля. Экспериментальная проверка этого способа измерения степени неоднородности магнитного поля показала, что точность определения градиента в допустимом для рассматриваемого прибора диапазоне значений составляет $1 \pm 3\%$. Следует особо отметить, что таким методом можно измерять градиенты и относительно нестабильных магнитных полей, если величина нестабильности не превышает амплитуды модулирующего магнитного поля. Это очень важное свойство магнитометра ЯМ-Ш, значительно расширяющее диапазон его возможностей.

Измерение ядерными магнитометрами магнитных полей, меньших 40-50 мтл, сопряжено с большими трудностями. Амплитуда резонансного сигнала пропорциональна ω^2 , при обычном широкополосном способе регистрации ЯМР становится соизмеримой с флюктуационными шумами автодинного детектора. Для измерения магнитных полей в диапазоне до 10 мтл разработан магнитометр, в котором для улучшения отношения сигнал/шум применен специальный

метод выделения резонансного сигнала /6/. Измеряемое поле модулируется двумя полями с частотами, отличающимися в ~ 60 раз. Усилительным трактом на первом этапе выделяется сигнал ЯМР на частоте, соответствующей второй гармонике высокочастотной модуляции измеряемого поля. Далее этот сигнал детектируется амплитудным детектором, проходит фильтр и наблюдается на экране контрольного осциллографа. Применение в тракте усиления резонансного сигнала узкополосного усилителя на относительно высокую частоту (6,4 кгц) существенно улучшает отношение сигнал/шум для регистрируемого сигнала, поскольку таким образом не только сужается общая полоса пропускания тракта, но и отфильтровывается наиболее существенная, низкочастотная компонента флюктуационных шумов автодина.

Для некоторых задач, требующих особо длительной безотказной работы измерителя магнитного поля разработан ядерный магнитометр, выполненный практически полностью на полупроводниковых приборах. Исключение составляет только индикатор- электронно-лучевая трубка. Такой магнитометр может непрерывно, без выключения и замены элементов работать тысячи часов, в то время как гарантированный срок службы лампового транзисторного варианта его не превышает 500-750 часов.

Рассмотренные ядерные магнитометры являются лабораторными измерителями, к которым не предъявляется требований достижения предельных для этого метода измерений точностей. Для большинства существующих и сооружаемых в настоящее время установок вполне приемлема точность абсолютных измерений ~0,01%.

Естественно, что ограничение гарантируемой точности позволило упростить как конструкцию приборов, так и методику измерений. Основными источниками ошибок в рассматриваемых приборах являются неточность определения середины резонансной линии и иногда, при использовании недостаточно точных частотомеров, ошибка в измерении генерируемой автодином частоты.

Таким образом, разработанный комплект ядерных магнитометров позволяет производить измерения абсолютных величин как однородных, так и сильно неоднородных магнитных полей в диапазоне 10 мТл + 2,5 Тл. Этот диапазон полей перекрывает практически все обычно используемые в приборах и установках экспериментальной ядерной физики магнитные индукции.

2. Автоматические электронно-счетные частотомеры для автодинных детекторов ЯМР

При измерении магнитных полей описанными в предыдущей главе ядерными магнитометрами необходимо измерять с высокой точностью частоту генерации автодинных детекторов ЯМР. К используемым для этой цели частотомерам предъявляются следующие требования: диапазон измеряемых частот 0,2 + 110 МГц; точность измерений не менее $10^{-3}\%$; чувствительность к входному сигналу 50 + 100 мВ; процесс измерений должен быть простым, не требующим каких-либо операций настройки в каждом цикле; желательно индцировать результаты измерений непосредственно в единицах измеряемого магнитного поля.

Наиболее полно все эти требования могут быть удовлетворены

электронно-счетными частотомерами (ЭСЧ). К их достоинствам следует отнести исключительно высокую точность измерений частоты, цифровую форму индикации результатов, автоматизм и, как следствие, быстроту измерений, возможность автоматической регистрации результатов измерений или их непосредственного ввода во входные устройства цифровых вычислительных машин. Поскольку промышленностью не производится ЭСЧ, удовлетворяющие всем перечисленным выше требованиям, в лаборатории в течение ряда лет велась разработка специализированных ЭСЧ, предназначенных для использования совместно с ядерными магнитометрами.

Ко времени начала разработки промышленностью выпускались электронно-счетные частотомеры типа ЧЗ-4, имеющие нужный диапазон измеряемых частот 0,1 + 100 МГц. Однако этот прибор обладал перечисленными выше положительными качествами только в диапазоне частот 0,1 + 10 МГц. На более высоких частотах при каждом измерении необходимо не только выбирать номер рабочего диапазона, но и настраивать входные блоки частотомера. Это значительно усложняет процесс измерений.

В 1963 г. в лаборатории был разработан новый ЭСЧ /8/ в значительной степени лишенный этого недостатка. Весь диапазон измеряемых прибором частот 0,1 + 100 МГц перекрывается пятью поддиапазонами по 20 МГц. Максимальная скорость счета первой декады счетного блока ЭСЧ составляла 22 МГц, поэтому на первом диапазоне входной сигнал после усиления и формирования поступает непосредственно на блок пересчетных декад прибора. На остальных диапазонах сигнал предварительно проходит преобразователь частоты. Набор опорных частот для преобразователя вырабатывается

умножителем частоты эталонного кварцевого генератора на 0,1 Мгц. Этот же генератор использовался и в блоке формирования эталонного временного интервала для управления схемой пропускания в тракте счета входных импульсов. В ЭСЧ применена регистрация результатов измерения на однострочном табло из цифровых газоразрядных ламп, а также на бумажной ленте при помощи цифрорепечатающей машинки типа СДМ-107, для которой был разработан электропривод клавиш. Длительность всего цикла измерения частоты, включая регистрацию результата измерений печатающей машинкой, составляет 2 сек. Применение этого частотомера при формировании магнитного поля изохронного циклотрона позволило существенно сократить время каждого цикла измерений топографии магнитного поля ускорителя.

В рассмотренном ЭСЧ процесс измерения частоты значительно проще, чем в частотомере ЧЗ-4, но все-таки он не может ^{быть} полностью автоматическим, поскольку еще остается ручная операция переключения диапазонов измеряемых частот. В 1964 г. был разработан широкодиапазонный, автоматический ЭСЧ, который благодаря высокому быстродействию первой пересчетной декады ^{/9/} позволяет без каких-либо операций настройки измерять частоту синусоидальных и импульсных сигналов в диапазоне 0,1+ 100 Мгц. Во временном блоке с кварцевым опорным генератором в зависимости от характера и условий измерений формируются эталонные временные интервалы величиной 0,01; 0,1; 1,0; 10,0 или 0,234870 сек. Четыре первые Δt , используются при измерении частоты генераторов общего применения, и на однострочном цифровом табло ЭСЧ

в этом случае результаты измерений регистрируются в единицах частоты- кгц. Пятый временной интервал, равный $\Delta t_5 = \frac{2\pi}{f_0} \cdot 10^7$; целевым образом предназначен для измерения частоты автодинных детекторов ЯМР протонов. В этом случае результат измерения частоты автодина регистрируется в единицах магнитного поля - мтл. Таким образом, при обработке результатов измерения магнитного поля исключается операция перевода резонансного значения частоты автодина в соответствующее значение магнитного поля. Результаты измерений регистрируются также на бумажной ленте цифрорепечатающей машинкой.

В последнее время в связи с появлением удачных разработок ядерных магнитометров эти приборы стали очень широко использоваться для измерения магнитных полей в различных установках. В этих условиях было признано целесообразным разработать специализированный ЭСЧ ^{/10/}, который за счет отказа от универсальности естественно мог быть лучше приспособлен к условиям работы в комплекте с ядерными магнитометрами. В этом частотомере в качестве первого быстрого делителя частоты применена двоично-пятеричная пересчетная ^{/11,12/} схема, выполненная на туннельных диодах и транзисторах. Максимальная скорость счета этой декады достигает 110 Мгц. Индикация осуществлена в виде однострочного цифрового семиразрядного табло на цифровых газоразрядных лампах. Во временном блоке ЭСЧ формируется эталонный временной интервал, равный 0,234872 сек, и, следовательно, единица старшего разряда на цифровом табло соответствует 1 тл, а младшего - 1 мкл. Точность измерения частоты этим ЭСЧ состав-

ляет $10^{-3}\%$ + 1 мкл. Следует отметить, что благодаря своему целевому исполнению и полной транзисторизации рассматриваемый ЭСЧ удобен в обращении, имеет небольшие размеры и относительно малый вес.

Характеристики разработанных электронно-счетных частотомеров позволяют принципиально по новому оценить возможности ядерных магнитометров с автодипными детекторами ЯМР. Высокая точность измерения частоты, автоматизм, возможность индикации величины измеряемых магнитных полей непосредственно в единицах поля - теслах и (что также в реальных лабораторных условиях измерений имеет первостепенное значение) транспортабельность специализированного образца ЭСЧ, позволяют создать мобильный комплекс приборов для прецизионных измерений однородных и неоднородных магнитных полей.

3. Магнитометры для измерения малых магнитных полей

Для прецизионных измерений магнитных полей в диапазоне до нескольких миллитесла обычно используются магнитометры с магнитонасыщенными зондами и ЭПР-магнитометры. В разработанном в лаборатории магнитометре /12/ с магнитонасыщенным зондом применяется компенсационный метод измерений. Поскольку магнитометр предназначался для измерения не только однородных, но, в основном, и неоднородных полей, использовался одностержневый тип датчика. Измеряемое поле модулируется синусоидальным магнитным полем, и момент полной компенсации, когда $H_z = H_x + H_y = 0$,

регистрируется по максимуму амплитуды первой гармоники в последовательности импульсов ЭДС, наводимых в сигнальной обмотке при перемагничивании зонда. Амплитуда U_c пропорциональна частоте ω и амплитуде $H_{\omega m}$ модулирующего поля, а также количеству витков в сигнальной обмотке. Однако попытка увеличения чувствительности датчика только за счет увеличения N и повышения частоты и амплитуды переключающего магнитного поля не приведет к желаемому результату, поскольку одновременно с ростом ЭДС, наведенной в сигнальной обмотке при перемагничивании датчика, будет расти и прямая наводка - ЭДС, наводимая в приемной катушке непосредственно модулирующим полем. Частота и фаза этой паразитной наводки будут естественно совпадать с частотой и фазой первой гармоники полезного сигнала. В результате отношение сигнал/шум в тракте усиления магнитометра практически не изменится (а может даже уменьшится) и увеличения реальной чувствительности прибора не произойдет.

Увеличивать сечение датчика S также не всегда целесообразно, так как одновременно с этим уменьшается отношение его характерных размеров e/d , а это приводит к резкому увеличению размагничивающего фактора N и соответствующему уменьшению эффективной магнитной проницаемости датчика μ_{eff} . Максимально допустимая длина датчика e определяется степенью неоднородности измеряемого магнитного поля. Для приборов многоцелевого назначения нежелательно длину датчика делать больше 10-15 мм.

Таким образом, чувствительность магнитометра с таким

датчиком может быть увеличена только в том случае, если будет найден способ отделения полезного сигнала от наводки.

В описываемом приборе для отделения сигнала, обусловленного перемагничиванием датчика от помехи, используется дополнительная, относительно низкочастотная модуляция поля H_1 магнитным полем H_{Ω} . Амплитуда низкочастотного модулирующего поля $H_{\Omega m}$ значительно меньше амплитуды переключающего поля $H_{\omega n}$ и сравнима с величиной коэрцитивной силы пермаллового датчика H_c . В результате амплитуда первой гармоники сигнала U_c оказывается промодулированной с частотой Ω . Глубина модуляции равна

$$m = \frac{4U_{cm} H_{\Omega m} P_{\Sigma}^1 S_m(\frac{\omega}{2} \Delta t_c)}{\pi H_{\omega n}^2 \left[\frac{4U_{cm} S_m(\frac{\omega}{2} \Delta t_c)}{\pi} + U_{n1} \right]} \cdot 100\% .$$

Если теперь напряжение, наведенное на сигнальной обмотке, протектирует амплитудным детектором с постоянной времени в цепи нагрузки, существенно большей периода T_n высокочастотного переключающего поля, но значительно меньшей, чем период низкочастотного модулирующего поля $T_{\Omega} = \frac{2\pi}{\Omega}$, то переменная составляющая сигнала на нагрузке детектора будет определяться только компонентой сигнала, обязанной перемагничиванию датчика. Таким образом, удается избавиться от помехи и действительно реализовать выигрыш в чувствительности датчика при увеличении скорости перемагничивания, или, что то же самое, частоты синусоидального переключающего поля ω . Полученный таким образом сигнал далее регистрируется фазовым детектором. Частота высокочастотного модулирующего поля равна 20 кГц, а низкочас-

тотного - 400 гц. Для облегчения процесса компенсации в магнитометре предусмотрена цепочка отрицательной обратной связи с выхода фазового детектора на управляющий вход регулируемого источника тока соленоида. Чувствительность магнитометра при отклонении стрелки нуль - элемента на 0,1 шкалы и неоднородности измеряемого магнитного поля вдоль сердечника не более 0,5 мТл/см составляет ~0,2 мкТл. Точность измерений при использовании в качестве регистрирующего прибора цифрового вольтметра ВЕ 2116 составляет 0,03% ± 0,2 мкТл.

Следует отметить, что поскольку результаты измерений регистрируются в цифровой форме и непосредственно в единицах магнитного поля - теслах, существенно облегчается и ускоряется процесс их математической обработки, особенно при большом объеме магнитных измерений, выполняемых, например, при формировании магнитного поля ускорителей. Информация с цифрового вольтметра может в этом случае непосредственно или через ленточный перфоратор вводиться в универсальные или специализированные вычислительные машины.

Магнитометры с магнитонасыщенными зондами являются относительно простыми измерителями поля, первичная градуировка и периодическая проверка которых должна производиться по приборам, измеряющим абсолютную величину магнитных полей. Для таких измерений с точностью 0,1 ± 0,05% в диапазоне полей до нескольких миллитесла целесообразно использовать ЭПР-магнитометры. В разработанных в лаборатории магнитометрах^{13/} используется автодинный метод детектирования ЭПР. Диапазон измеряемых полей составляет 0,4-3,5 мТл.

Частота резонансного поглощения электромагнитной энергии парамагнитным образцом в рассматриваемом диапазоне полей практически линейно зависит от величины индукции внешнего магнитного поля, и, следовательно, как и в ядерных магнитометрах, измерение магнитной индукции этими приборами сводится к измерению частоты, соответствующей середине линии поглощения при ЭПР. Для названного диапазона полей диапазон частот автодина — 10+100 Мгц. Выбор границ этого диапазона обусловлен следующими соображениями. Нижнее значение измеряемой индукции, равное ~0,4 мТл, является границей, ниже которой при использовании в датчике образца из ДФП точность измерений быстро падает из-за изменения g -фактора и значительной ширины резонансной линии. Верхняя граница обуславливается быстродействием ЭСЧ.

Существенное влияние на величину отношения сигнал/шум оказывает выбор частоты модулирующего магнитного поля.

Повышение частоты модуляции позволяет уменьшить уровень флюктуационных шумов на выходе автодинного детектора ЭПР, но одновременно приводит к увеличению паразитных синхронных наводок, затрудняющих работу фазового детектора. Поэтому при выборе оптимальной частоты модуляции в каждом конкретном приборе приходится принимать компромиссное решение. В рассматриваемом магнитометре частота модуляции выбрана равной 500 гц.

В приборе предусмотрены два режима измерения магнитного поля — ручной и полуавтоматический.

В режиме полуавтоматического управления сигнал с выхода фазового детектора включается последовательно с устанавливаемым вручную напряжением на варикапах, использованных в качестве контурных емкостей автодина. Таким образом обеспечивается автоподстройка частоты автодина к резонансному значению. При изменении (в некотором диапазоне) величины измеряемого магнитного поля частота автодина автоматически настраивается на новое резонансное значение. Это позволяет увеличить скорость измерения магнитного поля при градуировке относительных магнитометров и полностью автоматизировать процесс слежения за относительно медленными, небольшими по величине изменениями измеряемого магнитного поля.

Рассмотренный ЭПР-магнитометр является удобным и достаточно точным прибором, основным преимуществом которого по сравнению с ядерными магнитометрами с проточной жидкостью являются простота конструкции и транспортабельность.

4. Магнитометры с полупроводниковыми датчиками

Разнообразие задач, возникающих при формировании магнитного поля определенных конфигураций, порождает широкий диапазон требований к характеристикам магнитометров. В частности, точность измерений магнитного поля во многих случаях может составлять десятые доли процента, а иногда и несколько процентов. В этих условиях, особенно при недостаточной стабилизации поля или в очень неоднородных магнитных полях, целесообразнее использовать не ядерные магнито-

метры, а магнитометры с полупроводниковыми датчиками поля. Такими датчиками могут быть датчики Холла или некоторые типы транзисторов. В лаборатории разработано несколько образцов магнитометров как с холловскими, так и с транзисторными датчиками.

Холловский магнитометр средней точности /14/ выполнен в виде прямопоказывающего прибора со стрелочным индикатором в качестве регистрирующего прибора. Датчик размерами $5 \times 3 \times 0,2 \text{ мм}^3$ изготовлен из InAs . Возбуждающий ток стабилизирован транзисторным стабилизатором с точностью $5 \cdot 10^{-3}\%$. Весь диапазон измеряемых магнитных полей разбит на 7 поддиапазонов. Погрешность измерения поля составляет $\pm 0,8\%$. Если ЭДС Холла и величина тока возбуждения контролируется цифровым вольтметром типа ВІЕ 2ИІ6, то ошибка измерений уменьшается до $\pm 0,3\%$. Магнитометр компактен и очень удобен в обращении.

Характеристики имеющихся в настоящее время датчиков Холла позволили разработать магнитометр большой точности /15/. Датчик этого прибора размерами $1,8 \times 1,2 \times 0,3 \text{ мм}^3$ изготовлен из InPAs и термостатирован. Стабилизация температуры обеспечивается водой, омывавшей металлическую подложку датчика. Вода подводится из ультратермостата типа Е -143. В обычных лабораторных условиях при изменении внешней температуры на $\pm 5^\circ\text{C}$ температура датчика меняется не более чем на $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Датчик возбуждается током, стабилизированным с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-3}\%$ двухконтурным стабилиза-

тором с фотоэлектрическим усилителем Ф ІІ7/І в качестве "нуль-элемента". ЭДС Холла и величина тока возбуждения контролируются потенциометром Р-307 либо цифровым вольтметром соответствующего класса точности. Среднеквадратичная ошибка измерений составляет $\pm 0,05\%$. Этот магнитометр уже в течение ряда лет эксплуатируется в лаборатории как измеритель очень неоднородных магнитных полей с градиентом до $0,3 \text{ тл/см}$. При выбранных размерах датчика ошибка измерений из-за усреднения величины поля по площади датчика даже в таких неоднородных магнитных полях не превышает $0,05\%$.

Изменение в магнитном поле одной из основных характеристик полупроводниковых материалов-подвижности носителей тока μ_e и μ_n /16/ естественно приводит к некоторой зависимости от внешнего поля и параметров α и I_{k0} полупроводниковых триодов. Как показали исследования, характер и величина изменения статических характеристик триодов в магнитном поле определяется типом триода (плоскостной, точечный, сплавной, диффузионный); используемым в триоде полупроводниковым материалом (Ge , Si) и ориентацией транзисторов по отношению к направлению силовых линий внешнего магнитного поля. На кремниевые и высокочастотные диффузионные триоды внешнее магнитное поле почти не влияет. Изменение в поле статических характеристик плоскостных триодов с вплавленными переходами и точечных германиевых триодов значительно сильнее.

В диссертации приводятся результаты аналитического и экспериментального исследования влияния внешнего магнит-

ного поля на характеристики германиевых транзисторов. Количество влияние поля оказалось столь значительным, что было признано целесообразным использовать некоторые типы германиевых плоскостных и точечных триодов в качестве датчиков поля в магнитометрах. Их чувствительность выше чувствительности датчиков Холла и достигает 5-7 в/тл. Разброс чувствительности от образца к образцу для однотипных триодов не превышает 25%. Однако температурный коэффициент хуже чем у лучших холловских датчиков и составляет $\sim 0,5\%/1^\circ\text{C}$. Степень линейности характеристики существенно зависит от конструктивного исполнения триода и способа его включения. Для точечного триода характеристика практически линейна до $1+1,5$ тл, а для плоскостных, исключая начальный участок до $150+200$ мтл, линейная область еще шире: до $2+2,5$ тл. Для уменьшения температурной ошибки применяется термокомпенсация. В результате в диапазоне внешних температур $22-32^\circ\text{C}$ температурная погрешность снижается до 1%. Один из магнитометров этого типа с триодным датчиком типа П8 /17/ успешно эксплуатируется уже более 4-х лет без корректировки первичных градуировочных кривых. Этот опыт показывает высокую временную стабильность триодных датчиков магнитного поля.

Отличительной особенностью транзисторных магнитометров является еще и доступность в обычных лабораторных условиях всех компанующих прибор элементов, включая и собственно датчик поля - серийный широко распространенный транзистор. Во многих случаях этот фактор оказывается решающим при выборе метода измерений или типа магнитометра.

5. Математическая обработка результатов магнитных измерений

Для того чтобы проанализировать характер движения заряженных частиц в циклических ускорителях, необходимо обычно знать зависимость среднего поля $B_{\text{ср}}$ и амплитуд и фаз ряда гармоник распределения магнитного поля $B_z(\varphi)/r_0 = \text{const}$ от радиуса r_0 . Следовательно, получаемая в результате каждого цикла измерений функция распределения магнитного поля по окружности с радиусом r_0 $B_z(\varphi, r_0)/r_0 = \text{const}$ должна быть тем или иным способом разложена в ряд Фурье и вычислено необходимое количество коэффициентов разложения a_k и b_k . Для автоматизации выполнения этой математической операции, исключительно трудоемкой при ручном счете, в лаборатории разработаны специализированные вычислительные устройства - цифровой и аналоговый анализаторы гармоник.

Цифровой анализатор гармоник /18/ представляет собой по сути дела специализированную вычислительную машину, предназначенную для решения одного класса задач - вычисления по формулам Бесселя амплитуд и фаз ряда гармоник периодической функции $B_z(\varphi)$, заданной определенным ($2N$) количеством честных значений B_j в точках, равномерно распределенных по периоду 2π .

Применительно к требованиям, возникающим при формировании магнитного поля изохронных циклотронов в цифровом анализаторе обработка может вестись по 24, 36, 48, 72 или 144

равномерно распределенным по периоду значениям поля. Вычисляются гармоники следующих порядков: 1, 2, 3, 4, 6 и 8. Частные значения магнитного поля B_1 вводятся в машину либо путем ручного набора на шестизрядной десятичной клавиатуре, либо автоматически с выхода цифровых регистраторов магнитометров. Вывод результатов вычислений производится при помощи электроуправляемой цифроречатательной машинки типа ЭУМ-48. В машине принята система представления двоичных чисел с фиксированной запятой. Арифметическое устройство выбрано параллельного типа. Постоянное запоминающее устройство выполнено в виде диодных матриц. Оперативное ЗУ построено на основе матриц МОЗУ машины М-20, но с полупроводниковым устройством управления. Для выполнения программы анализа потребовалось 16 арифметических и логических операций. При тактовой частоте управляющих импульсов 20 кгц длительность операций умножения и деления составляет 3500 мксек; извлечения корня - 7500 мксек; сложения, сравнения по модулю и других коротких операций - 200 мксек. Большого быстродействия требовать от АУ анализатора нецелесообразно, поскольку уже при такой тактовой частоте время вычисления амплитуды $B_{\text{нл}}$ и начальной фазы $\varphi_{\text{нл}}$ какой-либо гармоники, даже по максимальному числу точек $2V = 144$, составляет ~3 сек, что на 2-3 порядка меньше времени одного цикла измерения распределения магнитного поля $B_2(\varphi)$, в течение которого получают исходные данные для счета B_1 .

На этапе предварительных, модельных исследований магнитной системы разрабатываемого ускорителя может использо-

ваться механический анализатор гармоник /19/. Особенность разработанного анализатора по сравнению с известными конструкциями /20/ является то, что анализ может производиться по таблично заданным значениям функции $B_2(\varphi)$ без дополнительных графических построений. Коэффициенты ряда Фурье могут быть определены этим прибором двумя способами: по формулам Бесселя и методом разрывов /20/. За один цикл счета определяется пять пар коэффициентов a_k и b_k . Желаемый набор вычисляемых гармоник задается установкой соответствующих блоков беззубчатых зубчатых колес в линии передачи движения к планиметрическим роликам. В приборе имеется комплект роликов, позволяющий определять любую гармонику от 1-ой до 24-ой. Отсчетное устройство на вводе данных позволяет устанавливать значения индукции B_1 и угол с точностью соответственно 0,05% и $0,1^\circ$. Многократные проверки анализатора путем сравнения величин коэффициентов a_k и b_k , полученных прибором и вычисленных аналитически, показали, что точность выделения гармоник анализатором при счете по формулам Бесселя составляет ~0,3%. Анализ методом разрывов технологически производится несколько проще, и приборная ошибка анализатора в этом случае составляет ~0,1%. Эти результаты сравнимы с приборной ошибкой лучших "классических" механических анализаторов гармоник, таких, как, например, анализатор Генричи-Коради, но конструктивно разработанный прибор значительно проще.

6. Системы стабилизации стационарных магнитных полей электромагнитов

В экспериментальной ядерной физике и ускорительной технике широко используются различные электромагниты с токами возбуждения до нескольких тысяч ампер. Для их питания необходимы стабилизированные источники постоянного тока с плавной регулировкой величины тока в нагрузке I_n в широком диапазоне значений. Наиболее широко для этой цели используются источники питания с системами стабилизации, в которых величина стабилизируемого тока контролируется по падению напряжения на эталонном сопротивлении (шунте). Однако при разработке высокостабильных систем питания на сотни и тысячи ампер очень трудно создать достаточно стабильные шунты из-за большой мощности (до нескольких киловатт), рассеиваемой этими сопротивлениями. В лаборатории разработана система стабилизации, в которой величина тока контролируется по индукции магнитного поля, создаваемого специальным небольшим электромагнитом, возбуждаемым стабилизируемым током I_n . Магнитная индукция между полюсными наконечниками измерительного электромагнита B_n зависит от тока, протекающего через обмотки магнита, числа витков в этих обмотках, величины зазора между полюсными наконечниками и степени связи имеющегося в датчике постоянного магнита с магнитной системой измерительного электромагнита. Следовательно, B_n состоит из двух компонент: поля от постоянного магнита B_p и поля B_T , создаваемого протекающим по катушкам стабилизируемым током I_n .

При стабильных размерах зазора и заданной магнитной связи с постоянным магнитом задача стабилизации тока I_n сводится к стабилизации магнитного поля B_n в зазоре измерительного электромагнита. Если поле B_n поддерживать постоянным и равным $B_{н0}$, то поскольку $B_T = f(I_n)$, величину стабилизируемого тока I_n можно изменять, меняя компоненту поля B_n , т.е. регулируя связь постоянного магнита с магнитной системой датчика тока. Величина поля выбрана равной 0,13 тл. При измерении этого поля датчиком на ЭПР с ДФПГ в качестве рабочего вещества погрешность измерений не превышает $3 \cdot 10^{-3}\%$. Для стабилизации параметров магнитной системы датчика он экранирован и термостатирован. Поглощающая камера ¹²², в которой детектируется ЭПР, питается от клистронного генератора, частота которого стабилизирована системой АПЧ по пассивному резонатору. В качестве эталонного резонатора используется резонансный волномер типа ВСТ-10, имеющий ТКЧ = $0,8 \cdot 10^{-3}\%/1^\circ\text{C}$. Длительные испытания системы стабилизации с рассматриваемым датчиком тока показали, что через 1,5-2 часа после включения нестабильность тока нагрузки не превышает $\pm 4 \cdot 10^{-3}\%$ за 8 часов работы.

В электромагнитах ряда устройств экспериментальной ядерной физики магнитное поле должно автоматически непрерывно или заданными ступенями меняться в некотором диапазоне значений. Для одного из таких устройств β -спектрометра с железным сердечником была разработана система стабилизации тока возбуждения с устройством сканирования ^{123,24,25}.

Стабилизация тока производится двухконтурной САР.

Первый контур представляет собой полупроводниковый стабилизатор напряжения питания магнита U_n последовательного типа. Коэффициент стабилизации первого контура равен ~ 1000 . Пульсации напряжения на выходе стабилизатора при максимальном I_n не превышают $0,1\%$, что для стабилизируемого электромагнита, постоянная времени обмотки возбуждения которого составляет ~ 1 сек, соответствует пульсациям тока в нагрузке, не превышающим $0,001\%$. Второй контур — стабилизатор тока I_n вырабатывает сигнал коррекции, который вводится в первый контур и корректирует напряжение U_n . Коэффициент регулирования второго контура равен ~ 300 . Таким образом, суммарный коэффициент стабилизации всей системы стабилизации постоянного тока в обмотке электромагнита β — спектрометра составляет $3 \cdot 10^5$. Длительные испытания системы стабилизации показали, что после двухчасового прогрева ток I_n в течение часа изменяется не более чем на $\pm 1 \cdot 10^{-3}\%$.

Сканирование тока производится изменением коэффициента деления напряжения, снимаемого с эталонного сопротивления в схеме сравнения второго контура САР. Регулирование тока I_n производится "шагами" по $0,01\%$; $0,02\%$; $0,03\%$ или $0,04\%$. Максимальное число шагов — 256. Диапазон регулирования тока до 10% от исходного значения $I_{н0}$. Неравномерность "шага" перестройки тока не превышает 2% от величины "шага".

Для стабилизации магнитного поля "по полю" с точностью 10^{-2} — $10^{-3}\%$ успешно используются стабилизаторы, основанные

на явлении ЯМР. Точность стабилизации магнитного поля ядерными стабилизаторами определяется в основном стабильностью частоты поперечного возбуждающего высокочастотного магнитного поля, создаваемого в объеме ампулы с "рабочим веществом". Сигнал ЯМР детектируется в ядерных стабилизаторах или при помощи автодина с мягким режимом возбуждения или различными модификациями мостового метода и метода ядерной индукции. Для стабилизации магнитного поля в широком диапазоне значений наиболее удобными являются автодинные детекторы ЯМР. В мостовом и индукционном методах перестройка датчика существенно сложнее, так как в этом случае, кроме регулирования резонансной частоты усилительного тракта, еще необходимо устранить дисперсионную компоненту сигнала ЯМР.

Существенным недостатком автодинных детекторов ЯМР является недостаточная стабильность частоты генерируемого высокочастотного напряжения. Параметрическая стабилизация частоты автодина обычно не позволяет достичь стабильности, лучшей чем $10^{-2}\%$ за час. За больший промежуток времени (сутки или неделя) уход частоты может достигать $0,1 \pm 1\%$. Для многих случаев такая стабильность недостаточна.

Кратковременная (в течение нескольких секунд или минут) стабильность частоты автодинных детекторов ЯМР может быть значительно лучшей. Это обстоятельство позволяет разработать систему стабилизации частоты, основанную не на непрерывном, а на периодическом контроле и коррекции стабилизируемой частоты /26/.

Принцип работы системы основан на периодическом сравнении с эталонным временным интервалом Δt_3 времени Δt_3 , необходимого для заполнения регистра счетных декад с регулируемым объемом импульсами, следующими с устанавливаемой частотой.

Выявленное при сравнении этих временных интервалов отклонение текущего значения частоты f_x от заданной величины f_x ликвидируется цепями обратной связи двумя способами, "Грубая" отработка ошибки производится электромотором, изменяющим емкость конденсатора резонансного контура автодина. "Точно" частота устанавливается при помощи варикапа, на который с релейного преобразователя "код-напряжение" подается напряжение, пропорциональное ошибке.

Выбор величины временного интервала Δt_3 в рассматриваемой системе стабилизации [27] определяется двумя факторами. Во-первых, как уже указывалось, от длительности Δt_3 зависит точность стабилизации частоты этим устройством. Для большинства устройств, используемых в экспериментальной ядерной физике (в том числе изохронных и "классических" циклотронов, магнитов поляризованных мишеней, магнитных спектрометров и т.д.) достаточна точность стабилизации магнитного поля, а, следовательно, и частоты автодинного детектора ЯМР, $\sim 10^{-3}\%$. Для такой точности и минимальной величины стабилизируемого поля 25мтл эталонный временной интервал должен быть не менее 0,1 сек.

Вторым фактором, влияющим на величину эталонного временного интервала, является желание устанавливать на регистре

переключателей значение стабилизируемого магнитного поля непосредственно в единицах поля-теслах. Для этого точное значение Δt_3 должно удовлетворять соотношению

$$\Delta t_{3\mu} = \frac{2\pi}{\nu_p} n 10^k, \quad (6.16)$$

где n - коэффициент пересчета делителя, устанавливаемого до регистра десятичных счетных декад с регулируемым объемом.

При $n = 4$ $\Delta t_{3\mu}$ также оказывается близким по величине к 0,1 сек. Его точное значение (с точностью до $\pm 10^{-3}\%$) в этом случае равно 0,093948 сек.

Эталонные временные интервалы вырабатываются временным блоком системы стабилизации путем последовательного умножения длительности периода высокой частоты опорного кварцевого генератора $T_{к2} = 1$ мксек на $(10^q - N_{с5})$, где q - количество декад в цепи деления частоты опорного кварцевого генератора $f_{к2}$, равное в рассматриваемом приборе пяти, а $N_{с5}$ - исходное состояние делителей в момент начала очередного цикла выработки эталонного временного интервала.

В зависимости от степени соответствия частоты стабилизируемого генератора f_x заданному значению f_x включается "грубая" или "точная" система отработки ошибки. Если частота входного сигнала отличается от заданной более чем на $\pm 0,02\%$, то включается система грубой отработки ошибки. Отклонения частоты f_x , меньшие 0,02%, устраняются только "точной" системой установки частоты.

Весь диапазон стабилизируемых магнитных полей от 40 мГл до 2,35 тл перекрывается шестью поддиапазонами. Максимальный коэффициент регулирования в зависимости от характеристик стабилизируемого электромагнита меняется от 100 до 400.

При стабилизации ядерными стабилизаторами магнитных полей больших электромагнитов с диаметром полюсных наконечников, превышающим $1 + 1,5$ м, датчики поля этих приборов, включающие относительно большое число деталей с ограниченным сроком службы, располагаются непосредственно в зазоре стабилизируемого магнита. Применение таких датчиков в системах стабилизации лабораторных электромагнитов затруднений не вызывает. В случае отказа датчик легко может быть извлечен и отремонтирован или заменен новым. Однако в некоторых установках, где после монтажа доступ к ним длительное время будет практически невозможен или сопряжен с большими трудностями, применение таких датчиков крайне нежелательно. Использование ЭПР позволяет разработать относительно широкодиапазонную систему стабилизации с более простыми и надежными датчиками магнитного поля /28/.

Непосредственно в поле стабилизируемого электромагнита размещается только поглощающая камера с образцом и катушки, создающие модулирующее магнитное поле. Генератор СВЧ и аппаратура для регистрации сигнала ЭПР располагаются на значительном удалении от электромагнита и связываются с поглощающей камерой при помощи волноводной линии необходимой длины. Поглощающая камера выполнена в виде отрезка волновода, зако-

роченного дроссельным поршнем. Образец из дифенилпикрилгидрида приклеивается на поверхность поршня. Для стабилизации относительно однородных магнитных полей профиль волновода может быть прямоугольным. Для неоднородных полей применяется более эффективная поглощающая камера П-образного сечения /29/. Камеры этого типа позволяют на порядок уменьшить объем образца по сравнению с прямоугольным профилем. Частота клистронного СВЧ-генератора стабилизируется системой АПЧ по пассивному эталонному резонатору.

Диапазон стабилизируемых прибором магнитных полей от 0,6 до 1,37 тл разбит на два поддиапазона: 0,6 + 0,37 тл и 0,97 + 1,37 тл.

Коэффициент стабилизации описываемой системы равен 70-80, и, следовательно, в комплекте со стандартным стабилизатором тока стабилизатор поля с датчиком на ЭПР позволяет удерживать заданное значение абсолютной величины магнитного поля с точностью $(1 + 3) \cdot 10^{-3} \%$.

З а к л ю ч е н и е

Описанные в работе приборы и системы представляют собой единый измерительный и стабилизационный комплекс, позволяющий в обычных лабораторных условиях разрабатывать, исследовать, сооружать и эксплуатировать магнитные системы практически всех используемых в современной экспериментальной ядерной физике установок со стационарными магнитными полями.

Л и т е р а т у р а

1. Э.Эндр. Ядерный магнитный резонанс. ИЛ (1957).
2. А.Лёйб. Ядерная индукция. ИЛ (1963).
3. А.Абрагам. Ядерный магнетизм. ИЛ (1963).
4. Д.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич. Измерительная техника, № 2, 56 (1968).
5. Д.П.Василевская, Л.В.Васильев, Д.Н.Денисов. ПТЭ, № 1, 174 (1965).
6. V.Dose. Nuclear Instr. and Methods, 34, 235 (1965).
7. Д.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич. Ядерный магнитометр на полупроводниковых триодах. ГОСИТИ, 17-63-438/2 (1963).
8. Д.Н.Денисов, Д.И.Сусов, П.Т.Шишлянников. Электронно-счетный частотомер. Препринт ОИЯИ, Р-1555 Дубна, 1964.
9. П.П.Гавриш, Д.Н.Денисов, А.Г.Комиссаров и др. ПТЭ, № 2, 94 (1965).
10. Д.Н.Денисов, В.М.Лачинов, Д.И.Сусов, П.Т.Шишлянников. Измерительная техника, № 1, 49 (1968).
11. Д.Н.Денисов, В.М.Лачинов, В.И.Прилипка, ПТЭ, № 4, 83 (1965).
12. Д.Н.Денисов, А.Г.Комиссаров, П.Т.Шишлянников. Магнитометр с пермалловым датчиком. Препринт ОИЯИ, 2883, Дубна, 1966.
13. Д.Н.Денисов, В.В.Калиниченко. Транзисторный ЭПР-магнитометр. Препринт ОИЯИ, 13-3013-1, Дубна, 1966.
14. Д.П.Василевская, Д.Н.Денисов, Н.И.Дьяков. Измерительная техника, № 5 (1966).
15. Д.П.Василевская, Д.Н.Денисов, Н.И.Дьяков. ПТЭ, № 5, 203 (1966).

16. Д.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич. О влиянии магнитного поля на характеристики полупроводниковых диодов и триодов. Препринт ОИЯИ, 1083, Дубна, 1963.
17. Д.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич. ПТЭ, № 6, 125 (1964).
18. В.Н.Аносов, Д.Н.Денисов, Н.И.Дьяков, В.И.Прилипка, Д.И.Сусов, П.Т.Шишлянников. ПТЭ, № 2 (1968).
19. А.Т.Василенко, Д.Н.Денисов. ПТЭ, № 6, 78 (1963).
20. М.Г.Серебрянников. Гармонический анализ. Гостехиздат (1948).
21. Д.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, В.В.Калиниченко. ПТЭ, № 2, 177 (1966).
22. Д.Н.Денисов, В.В.Калиниченко. ПТЭ, № 2, 134 (1965).
23. I.Adam, V.G.Chumin, Yu.N.Denisov et al. Препринт ОИЯИ, Е-2494, Дубна, 1968.
24. И.Адам, Д.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, М.Фингер ПТЭ, № 2, 136 (1965).
25. И.Адам, Д.Н.Денисов, А.Ковня, В.Г.Чумин, П.Т.Шишлянников. Известия АН СССР, сер. физ., т. XXIX, № 12, 2147 (1965).
26. Д.Н.Денисов, А.Г.Комиссаров, В.И.Прилипка, Д.И.Сусов, П.Т.Шишлянников. ПТЭ, № 3, 107. (1966).
27. Л.В.Васильев, Д.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич и др. Универсальный ядерный стабилизатор магнитного поля с плавной перестройкой стабилизируемой величины поля. Препринт ОИЯИ, 2439, Дубна, 1965.
28. Д.Н.Денисов, С.А.Ивашкевич, В.В.Калиниченко, ПТЭ, № 1, 158 (1966).
29. Д.Н.Денисов, В.В.Калиниченко ПТЭ, № 3, 152 (1966).

Рукопись поступила в издательский отдел
21 августа 1968 г.

Рис. 1а

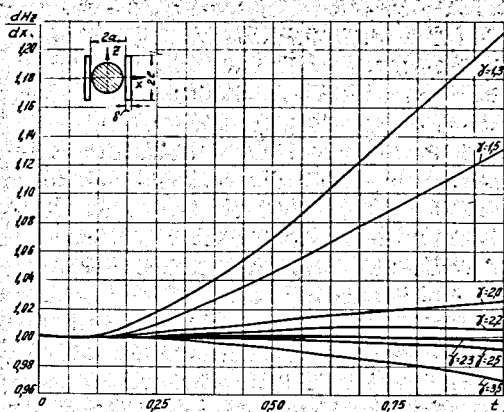


Рис. 1б

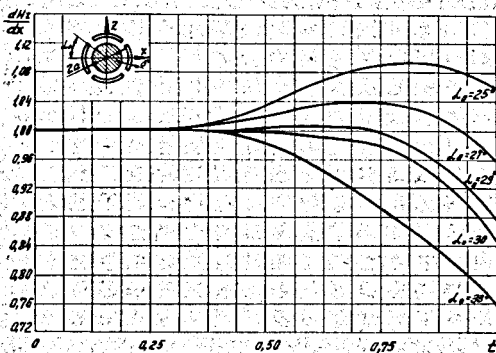


Рис. 2

