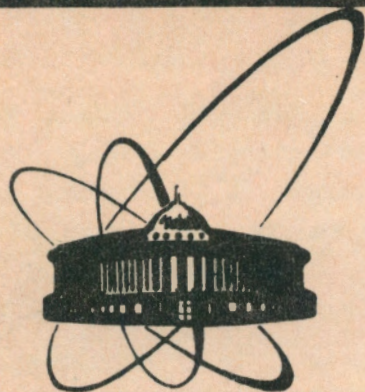


92-188



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P10-92-188

**Е.И.Литвиненко, Ю.В.Обухов, В.Н.Шатохин,
Н.А.Яковенко**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
ИЗМЕРИТЕЛЯ МАЛЫХ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ**

1992

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе описана организация автоматизированной системы сверхпроводящего квантового измерителя малых магнитных моментов [1, 2]. Автоматизированная система реализована на базе персонального компьютера IBM PC/AT и крейта КАМАК с использованием контроллера КК009 [3]. Измерительная установка условно может быть разбита на 4 основные подсистемы:

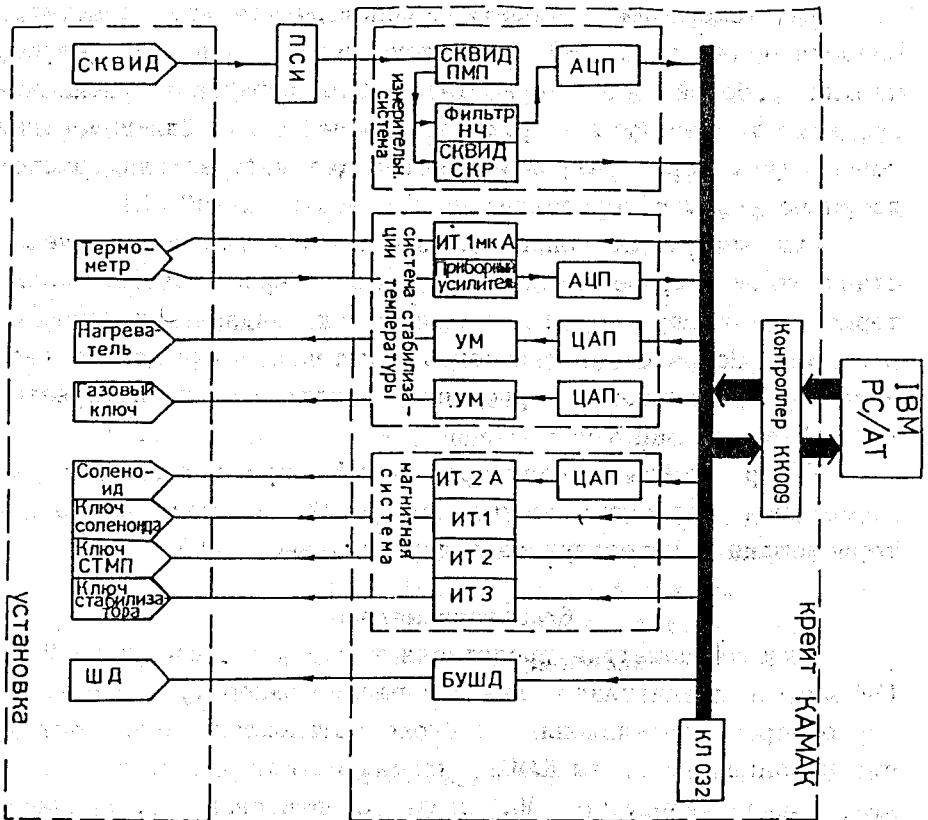


Рисунок 1. Схема электронного оборудования магнитометра.

**Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА**

темы: систему измерения и стабилизации температуры, подсистему ввода магнитного поля, подсистему измерений сигнала СКВИДа и систему перемещения образца (см. рис.1). В работе приведено описание электронного оборудования и программного обеспечения каждой подсистемы, а также описание основных рабочих программ.

1. СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Приведенная система измерения и стабилизации температуры позволяет получить стабильность температуры не хуже 5 мК при 5 К и 30 мК при 100 К.

Для измерения температуры используются два термометра сопротивления типа ТВО, расположенные в нижней и верхней частях рабочей зоны термостата. Это позволяет уменьшить градиент температуры в пределах рабочей зоны. Для изменения температуры термостата применяются два нагревателя, расположенные рядом с термометрами, и газовый "ключ" [2].

Для измерения сопротивления термометров используется стандартный четырехконтактный метод. Через токовые концы термометра пропускается постоянный ток, задаваемый источником тока. Напряжение, снимаемое с потенциальных концов термометра, усиливается приборным усилителем и измеряется интегрирующим АЦП.

Набор блоков в стандарте КАМАК, предназначенных для проведения термометрических измерений, состоит из блока термометрии и интегрирующего двухканального АЦП.

Блок термометрии

Блок термометрии представляет собой модуль шириной 2М (34,4мм) и предназначен для измерения температуры с помощью термометра сопротивления. В блоке установлены две идентичные независимые платы КАМАК, каждая из которых может обслужить один термометр. На плате смонтированы программно-управляемый источник постоянного тока термометра и приборный дифференциальный усилитель с программируемым коэффициентом усиления.

Источник тока может генерировать постоянный ток 0, 1; 10, 100 мкА. В токовую цепь последовательно с термосопротивлением включено калибровочное сопротивление, которое используется для калибровки всего канала измерения температуры. Относительная стабильность тока источника $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ в температурном диапазоне $15 \div 30^\circ\text{C}$.

Приборный дифференциальный усилитель состоит из предварительного усилителя с нерегулируемым коэффициентом усиления, устанавливаемым в зависимости от конкретного термометра, и программируемого каскадного усилителя со следующими коэффициентами усиления: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64. Для калибровки коэффициента усиления вход усилителя может программно подключаться к калибровочному сопротивлению. Стабильность усилителя не хуже $2 \cdot 10^{-3}$ в диапазоне температур $15 \div 30^\circ\text{C}$.

Команды блока:

N A(2) F(16)	i=0	ток термометра 0 мкА,
	i=1	ток термометра 1 мкА,
	i=2	ток термометра 10 мкА,
	i=4	ток термометра 100 мкА;
N A(4) F(16)	i=0	измерение сигнала термометра,
	i=1	измерение сигнала калибровочного сопротивления;
N A(1) F(16)	i	- коэффициент усиления,
	0	- 1·К коэффициент
	1	- 2·К предварительного усиления
	2	- 4·К K = 100 3000
	3	- 8·К (устанавливается в зависи-
	7	- 16·К симости от конкретного
	11	- 32·К термометра)
	15	- 64·К

Интегрирующий АЦП

Интегрирующий АЦП (интегратор) выполнен с использованием БИС АЦП последовательных приближений КР572ПВ1 и трехрежимного интегратора, построенного на базе операционного усилителя КР140УД18 и аналоговых коммутаторов КМОП.

Интегратор предназначен для интегрирования аналогового сигнала с периодом 20 мсек и последующей оцифровкой.

Входным для интегратора является напряжение, снимаемое с терморезистора и усиленное программируемым усилителем блока термометрии.

Для двух интеграторов с запоминанием и стиранием используется один АЦП. После подачи команды "запуск" интеграторы одновременно включаются в режим "заряд". По истечении периода интегрирования, который задается кварцевым генератором и счетчиком, интегратор переходит в режим хранения накопленного заряда. Одновременно включается схема определения знака и последовательного поразрядного уравнивания для первого интегратора. После этого первый интегратор переходит в режим стирания, а код АЦП записывается в буферный регистр. АЦП переключается на выход второго интегратора. После оцифровки второй интегратор также переходит в режим стирания. Через 200 мсек прибор готов к считыванию и новому запуску. Все внутренние функции блока управляются встроенным последовательным логическим автоматом, тактируемым частотой кварцевого генератора.

Команды блока:

N A(0) F(0) - чтение кода от входа 1,

N A(1) F(0) - чтение кода от входа 2,

N A(0) F(8) - проверка готовности,

N A(1) F(18), $i = 0..15$ - запуск интегратора, при котором время интегрирования изменяется в пределах $0 \div 5\%$ в зависимости от значения i .

Результат выводится на шину КАМАК, разряды R1-R12 - модуль в прямом коде, R13 - знак (1 - плюс, 0 - минус).

Для данного набора блоков построена следующая процедура измерений.

По машинному таймеру (прерывание 1сН Timer User Interrupt) с частотой 18,2 Гц с интегрирующего АЦП считывается напряжение на термометре и включается либо выключается ток термомера (в нашем случае 10 мкА). Сигнал при выключенном токе программно вычитается из сигнала при включенном

токе. Таким образом устраняется температурный дрейф нуля усилителей и исключается влияние паразитных термо-э. д. с., возникающих в цепи термометра.

Затем программа проводит проверку величины сигнала после усиления и в необходимых случаях меняет коэффициент усиления. Каскадный программируемый усилитель позволяет усилить сигнал термометра так, что он попадает в промежуток $2,5 \div 5$ В, при этом измерения на АЦП производятся с точностью близкой к максимальной.

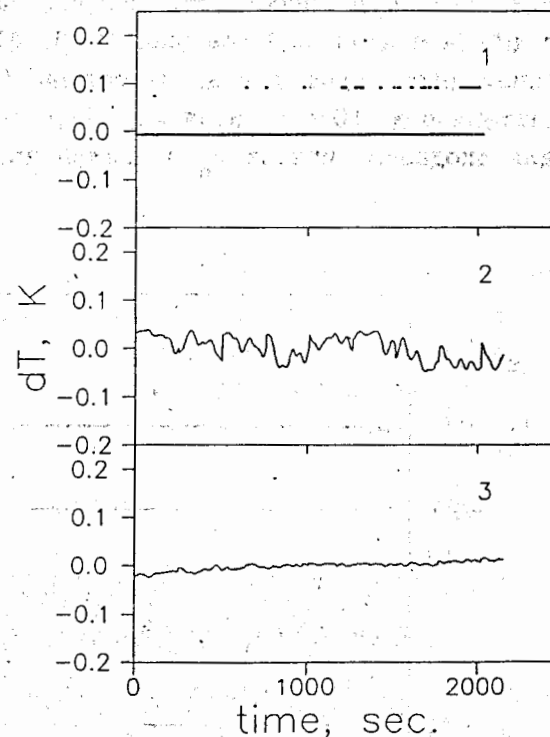


Рисунок 2. Отклонение сигнала термометра от среднего значения в зависимости от времени. 1 - без избыточного шума интегратора и без фильтра (шум на уровне одной дискреты АЦП), 2 - без избыточного шума интегратора после НЧ фильтрации, 3 - с избыточным шумом интегратора после НЧ фильтрации.

Интегрирующий АЦП имеет обычную для микросхемных сборок значительную дифференциальную нелинейность. Для ее устранения на АЦП программно подается избыточный шум, формируемый путем изменения времени интегрирования в пределах $0 \div 5\%$. Шум представляет собой псевдослучайную последовательность длиной 23 числа, т.е. имеет характерную частоту 0,8 Гц. Оцифрованный сигнал затем пропускается через программно-реализованный цифровой фильтр низких частот с частотой среза 0,1 Гц. Выбранный способ измерения позволяет сгладить дифференциальную нелинейность, кроме того он увеличивает разрешающую способность системы на порядок по сравнению с дискретностью АЦП (см рис. 2, 3, 4).

Фильтрация производится низкочастотным (НЧ) цифровым фильтром Баттерворта 10-ого порядка. При этом выходной сигнал y_n для входного сигнала x_n в каждой временной точке

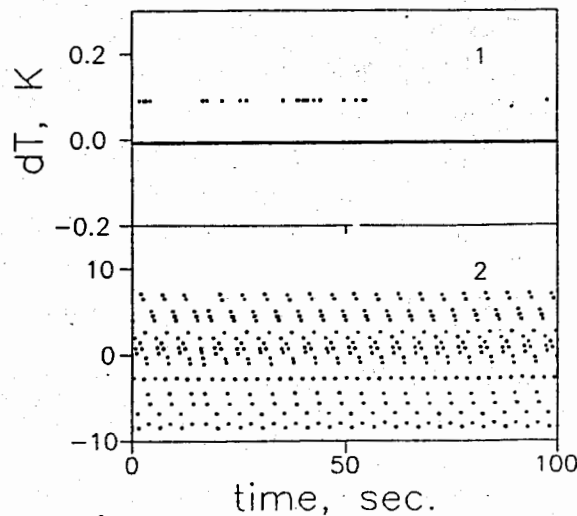


Рисунок 3. Отклонение сигнала термометра от среднего значения в зависимости от времени. 1 - без избыточного шума интегратора и без фильтрации (шум на уровне одной дискреты АЦП), 2 - с избыточным шумом интегратора без фильтрации.

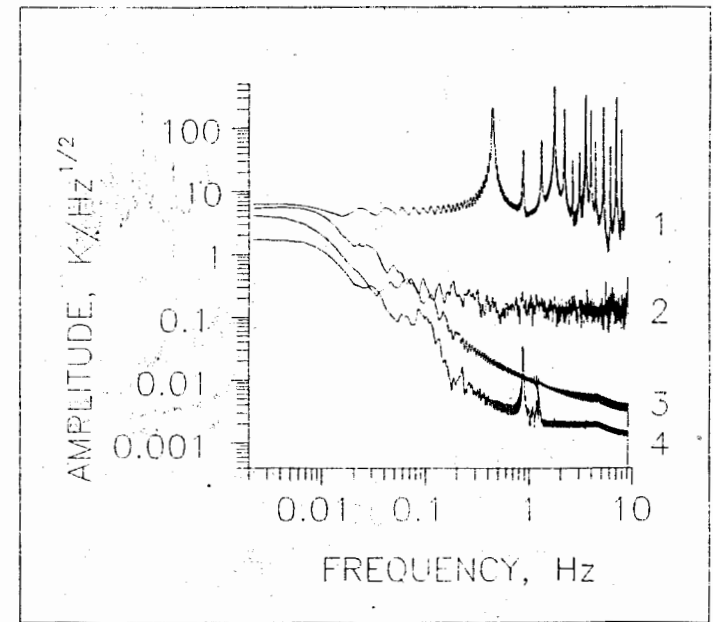


Рисунок 4. Спектры шума сигнала термометра. 1 - с избыточным шумом интегратора без фильтрации, 2 - без шума интегратора и без фильтрации, 3 - без шума интегратора с фильтрацией, 4 - с избыточным шумом интегратора и с фильтрацией.

$t = n \cdot \Delta t$ вычисляется по формуле

$$y_n^{(j)} = a^{(j)} (y_{n-2}^{(j-1)} + 2y_{n-1}^{(j-1)} + y_n^{(j-1)}) - b_1^{(j)} y_{n-2}^{(j)} - b_2^{(j)} y_{n-1}^{(j)}$$

где $j = 1..5$ - номер звена фильтра, $y^{(0)} = x$.

Коэффициенты $a^{(1..5)}$ и $b_{1,2}^{(1..5)}$ зависят от частоты среза фильтра и частоты выборки 18.2 Гц [4] и вычисляются специально написанной программой digfiltr.exe для расчета коэффициентов типичных цифровых фильтров. Амплитудно-частотные зависимости входного сигнала, снятого с терморезистора, и отфильтрованных сигналов для некоторых из рассмотренных фильтров представлены на рисунке 5.

Используя измерение на калибровочном сопротивлении, можно вычислить коэффициент передачи для всего температур-

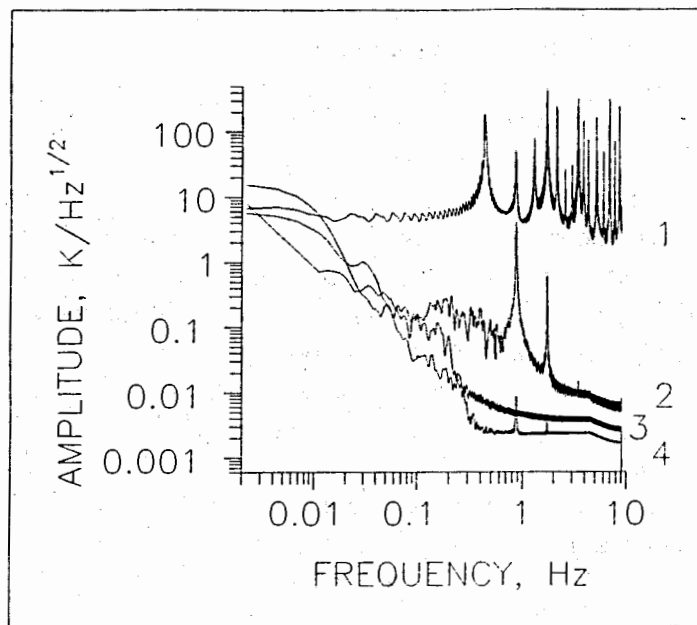


Рисунок 5. Амплитудно-частотные зависимости входного сигнала, снятого с терморезистора (1), и отфильтрованных сигналов: 2 - два фильтра 6 порядка - Чебышева (частота среза 0,3 Гц) и Баттерворта (0,1 Гц); 3 - фильтр Баттерворта 6 порядка с частотой среза 0,05 Гц; 4- фильтр Баттерворта 10 порядка с частотой среза 0,05 Гц.

ного канала. Коэффициенты передачи для всех значений усиления каскадного усилителя определяются автоматически при запуске специальной программы калировки температурных каналов. Результаты сохраняются в файле и используются рабочей программой.

Измеренная величина сопротивления преобразуется в значение температуры с использованием градуировочной функции термометра $\ln(T) = \sum_{n=0}^6 A_n (\ln R)^n$, коэффициенты A_n которой были найдены путем аппроксимации калировочных точек $T_i (R_i)$ термометра полиномами Чебышева [5].

Стабилизация температуры осуществляется путем изменения тока печек термостата и газового "ключа" при помощи программируемых источников тока.

Программируемый источник тока

Программируемый источник тока выполнен в стандарте КАМАК и представляет собой модуль шириной 1М (17,2 мм), в котором смонтированы два независимых канала, включающих в себя входной регистр КАМАК, 10-ти разрядный цифроаналоговый преобразователь, источник опорного напряжения и преобразователь напряжение - ток для заземленной нагрузки.

Источники вырабатывают ток только одной полярности, величина которого устанавливается кодом, записываемым во входной регистр командой:

N A(0) F(16) - канал 0, код j = 0..1023
 (I_{ВЫХ} = 0 мА..100 мА);
 N A(1) F(16) - канал 1.

Мы применяем два вида регулирования температуры - грубый и точный. Грубый работает при отклонениях температуры ≥ 2 К, точный - < 2 К. При грубой регулировке управляющее воздействие на нагреватели определяется по формуле

$$I^2 = C/R \cdot \left(\Delta T + \frac{1}{\tau} \cdot \Delta T \right),$$

при точной:

$$I^2 = C/R \cdot \left(\frac{2}{\tau} \cdot \Delta T + \frac{1}{\tau^2} \cdot \Delta T \right),$$

где ΔT - отклонение температуры от требуемого значения, I - ток нагревателей термостата, C/R и τ - параметры процесса.

Постоянные C/R и ток, подаваемый на газовый ключ, являются константами в определенных заранее диапазонах температур. Постоянная τ определяет время переходного процесса и должна быть больше, чем постоянная времени НЧ фильтра, используемого при измерении температуры, и характерное время релаксации температуры термостата.

Параметр C/R - это отношение теплоемкости термостата к сопротивлению нагревателя. Эта величина сильно зависит от температуры и меняется во всем температурном диапазоне примерно в 100 раз. Поэтому при помощи специальной программы проводятся предварительные измерения зависимости этого параметра от температуры, и весь температурный диапазон разбивается на промежутки, в которых величина C/R

считается постоянной. Таким образом можно добиться устойчивости процесса стабилизации температуры во всей области рабочих температур.

При стабилизации температуры с двумя термометрами один канал температуры считается основным и используется для стабилизации температуры около необходимого значения, второй - дополнительным. Он используется для стабилизации температуры около значения первого термометра. Это дает возможность изменять температуру термостата с минимальными градиентами.

Во время работы программы температура, напряжение нагревателя и холодильника (газового ключа) выводятся на экран дисплея в виде графиков зависимости этих данных от времени.

2. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитная система состоит из короткозамкнутого сверхпроводящего соленоида и сверхпроводящего стабилизатора магнитного потока. Диапазон изменения магнитного поля составляет $10^{-2} \dots 2 \cdot 10^2$ Э. Относительная стабильность магнитного поля не хуже 10^{-6} . Время выхода на режим стабильного поля не более 10 минут.

Для изменения поля в зоне образца необходимо подать на соленоид соответствующий нужному магнитному полю ток, перевести в нормальное состояние тепловой ключ соленоида, перевести в нормальное состояние сверхпроводящий стабилизатор магнитного потока, затем опять перевести в сверхпроводящее состояние все тепловые ключи. Для этого используется управляемый источник тока соленоида и источник тока тепловых ключей.

Ток соленоида задается программируемым универсальным источником тока, который выполнен в стандарте КАМАК и представляет собой модуль шириной 1М (17,2 мм).

Программируемый универсальный источник тока соленоида

Источник работает на заземленную нагрузку. Величина выходного тока (не более 2 А) устанавливается кодом,

который записывается во входной 10-ти разрядный регистр КАМАК командой

$N A(2) F(16), \quad j = 0 \dots 1023, \quad I_{\text{вых}} = 0 \text{ мА} \dots I_{\text{max}}$
Полярность выходного тока устанавливается командой
 $N A(1) F(16), \quad j = 0, \quad + I_{\text{вых}}$
 $j = 1, \quad - I_{\text{вых}}$

Варьирование выходного тока возможно в двух диапазонах, устанавливаемых командой

$N A(0) F(16), \quad j = 0, \quad I_{\text{max}} = 10 \text{ мА},$
 $j = 1, \quad I_{\text{max}} = 2 \text{ А}.$

Источник тока тепловых "ключей"

Источники тока тепловых "ключей" управляются в стартоповом режиме как программно, так и вручную. Команды блока:

$N A(1) F(16)$ - тепловой ключ 1,
 $j = 0$ - выкл, $j = 1$ - вкл.,
 $N A(2) F(16)$ - тепловой ключ 2,
 $N A(3) F(16)$ - тепловой ключ 3.

Тепловые "ключи" и ток соленоида подключаются при изменении поля по указанной выше последовательности на заранее определенное время. Для этого используется машинный таймер.

3. СИСТЕМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБРАЗЦА

Система перемещения образца полностью управляется при помощи блока управления шаговым двигателем. Она предназначена для перемещения образца на необходимое расстояние и генерации строба внешнего запуска для синхронной работы АЦП. Максимальное перемещение образца составляет 70 мм. Точность отслеживания координаты - $2,5 \cdot 10^{-3}$ мм.

Блок управления шаговым двигателем выполнен в стандарте КАМАК и представляет собой модуль шириной 2М (34,4 мм). Блок предназначен для шагового двигателя типа ДШИ-200-1-3 и ему аналогичных (четыре обмотки, напряжение

питания обмоток не более 5 В, ток до 1,5 А). Блок выполняет следующие функции:

- автоматическая начальная блокировка движения при подаче питания в модуль;
- управление скоростью вращения вала двигателя;
- программный пуск-останов двигателя;
- управление направлением вращения вала двигателя;
- ручная блокировка движения;
- обработка двигателем заданного количества шагов;
- считывание текущей условной координаты;
- выработка внешних управляющих импульсов для синхронизации работы внешних устройств с работой двигателя;
- обработка сигналов концевых выключателей;
- внешняя индикация работы двигателя и причин его останова.

С целью достижения максимальной частоты вращения вала двигателя в блоке предусмотрено форсированное питание обмоток двигателя.

Основным элементом устройства является таймер КР580ВИ53, который представляет собой три программируемых счетчика СТ0, СТ1 и СТ2.

СТ0 используется для управления скоростью вращения путем записи во внутренний регистр таймера коэффициента деления тактовой частоты 1 МГц.

СТ1 используется для обработки двигателем определенного количества шагов, которое также записывается во внутренний регистр таймера.

СТ2 работает аналогично СТ0 и предназначен для формирования импульсов запуска внешнего аналого-цифрового преобразователя с целью синхронизации его работы с вращением вала двигателя.

Установка режимов работы счетчиков осуществляется путем записи управляющего слова и начального значения содержимого счетчиков. Управляющее слово (D7...D0) задает

D7, D6 - номер счетчика:	D7 D6
	0 0 - СТ0,
	0 1 - СТ1,
	1 0 - СТ2,
	1 1 - запрет;

D5, D4 - последовательность записи и считывания содержимого счетчика:

D5 D4
0 0 - защелкивание,
0 1 - младший байт,
1 0 - старший байт,
1 1 - два байта;

D3-D1 - режим работы (определяет формирование выходных импульсов):

D3 D2 D1
1 1 0 - формирование строба (1 мкс),
1 1 1 - прямоугольный сигнал;

D0 - вид используемого кода (D0 = 0 - двоичный).

Так как содержимое счетчиков составляет два байта, загрузка и считывание содержимого осуществляются с помощью двух команд (начиная с младшего байта, если запрограммировано чтение двух байтов: D5 = D4 = 1). Прочитать содержимое любого счетчика можно двумя способами:

- приостановив работу счетчика блокировкой тактовых импульсов (команда "стоп" N A(4) F(16), j>2);
- записав в таймер управляющее слово, содержащее нули в разрядах D4, D5 ("защелкивание").

Блок вырабатывает следующие сигналы:

- X - команда принята,
- L - запрос обслуживания, выставляемый если двигатель отработал заданное количество шагов (СТ1 = 0) или сработал концевой выключатель. При срабатывании любого концевой выключателя движение блокируется и будет невозможно до тех пор, пока направление движения не будет изменено на противоположное.

Команды управления :

Снятие начальной блокировки движения: N A(0) F(26)

Запись управляющего слова счетчика:

CT0: N A(3) F(16), j = 60 - режим без форсировки питания обмоток двигателя

j = 62 - режим с форсированным питанием обмоток;

CT1: N A(3) F(16), j = 124,

CT2: N A(3) F(16), j = 188 - строб длительностью 1 мкс,

j = 190 - прямоугольный сигнал.

Загрузка счетчика:

CT0: N A(0) F(16), j = K1 > 830 (коэффициент деления тактовой частоты 1 МГц, определяет скорость вращения вала двигателя);

CT1: N A(1) F(16), j = K2 < 65536 (количество шагов, которое необходимо отработать);

CT2: N A(2) F(16), j = K3 (коэффициент деления тактовой частоты 1 МГц, определяет частоту импульсов для синхронизации внешних устройств).

Управление движением:

N A(4) F(16), j = 0 - движение вправо,

j = 1 - движение влево,

j > 2 - стоп.

Запрет выхода L-запроса: N A(0) F(24).

Разрешение выхода L-запроса : N A(0) F(26).

Чтение и сброс LAM-регистра : N A(0) F(2),

j = 256 - обнулен счетчик CT1, т.е. двигатель отработал заданное количество шагов;

j = 1024 - сработал левый концевой выключатель;

j = 2048 - сработал правый концевой выключатель.

Чтение содержимого счетчиков:

CT0: N A(0) F(0),

CT1: N A(1) F(0),

CT2: N A(2) F(0).

Специальный программный модуль для работы с блоком управления шагового двигателя обслуживает основные возможности данного блока и может применяться в других системах.

После того как образец помещен в магнитометр, он ориентируется системой перемещения относительно приемных петель магнитометра. Затем образец выставляется в начальное положение и производится измерение при движении на расстояние примерно 40 мм. Типичный пример получаемой картинки приведен на рисунке 6.

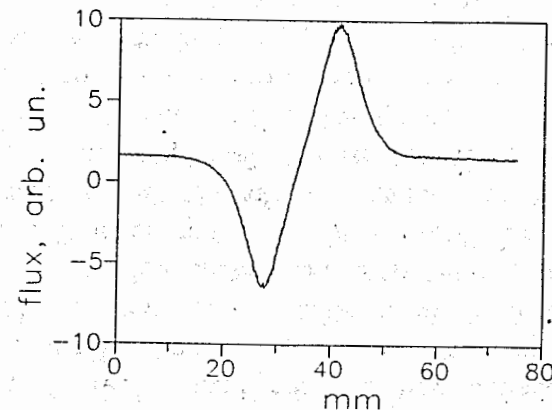


Рисунок 6. Сигнал от пробной катушки с током ($8 \cdot 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{m}^2$) в зависимости от его координаты для точечного источника.

4. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Процесс измерения магнитного момента образца заключается в следующем. Образец при движении через приемную катушку магнитометра изменяет в ней магнитный поток. Это изменение потока измеряется СКВИДом. При движении образца через две катушки, намотанные навстречу друг другу, получаем характерную зависимость сигнала СКВИДа от координаты образца (рис. 6). Амплитуда приведенного на рисунке сигнала пропорциональна магнитному моменту образца. Более подробно принцип измерения изложен в работе [2].

Разрешающая способность магнитометра по магнитному моменту составляет $3 \cdot 10^{-12} \text{ А} \cdot \text{м}^2 / \text{Гц}^{1/2}$.

Сигнал от СКВИДа через предварительный усилитель ПСИ поступает на блоки СКВИД ПМП и СКВИД СКР [6]. Счетчик квантов СКР имеет на выходе 21 разряд, опрос которых осуществляется при помощи расширителя слова КЛО32. Дробная часть сигнала СКВИДа, которая выдается блоком ПМП, измеряется АЦП и программно суммируется с целой частью от СКР. Для фильтрации сигнала ПМП перед АЦП в блоке СКР предусмотрен ряд фильтров низких частот второго порядка с частотой среза от 0,05 до 100 Гц. При измерениях синхронно с движением образца, как уже указывалось выше, для считывания сигнала СКВИДа подается "запуск" на АЦП от СТ2 в блоке управления шаговым двигателем. Измеренные зависимости сигнала СКВИДа от координаты для образца и для точечного источника сигнала единичной амплитуды позволяют получить в результате обработки магнитный момент образца.

Программное обеспечение системы предусматривает средства выполнения измерений сигнала СКВИДа для трех режимов: измерения при сканировании с заданной частотой, разовые (одиночные) измерения при достижении каких-то условий и измерения сигнала синхронно с движением образца. Значения магнитного момента вычисляются по измеренным значениям сигнала СКВИДа (методика калибровки установки описана в работе [2]).

5. РАБОЧИЕ ПРОГРАММЫ

В процессе разработки программного обеспечения автоматизированной системы магнитометра требовалось обеспечить проведение большого числа различных видов измерений, вытекающих из возможностей данной установки, и возможность сравнительно легкого ввода в программу новых алгоритмов измерений в будущем. Подход к разработке программного обеспечения соответствует изложенному в работе [7].

Как описано выше, электроника данной установки, позволяет программно управлять следующими параметрами:

температурой образца (регулированием напряжения, подаваемого на нагреватели и газовый ключ), величиной намагничивающего магнитного поля (заданием тока, подаваемого на соленоиды) и положением образца на вертикальной оси (шаговый двигатель). Имеется также возможность задавать частоту сканирования при считывании сигнала СКВИДа без или синхронно с движением образца.

Для работы с установкой и проведения измерений разработаны следующие программы (алгоритмы) конкретных измерений.

1. Калибровка системы термометрии. Температурный канал подключается к калибровочному сопротивлению и измеряется напряжение на нем для всех диапазонов каскадного усилителя. Способ измерения сигнала с калибровочного сопротивления идентичен способу измерения термосопротивления. Это позволяет с максимальной точностью определить ток и коэффициенты усиления каждого каскада. Калибровочные константы для всех диапазонов каскадного усилителя сохраняются в файле.

2. Измерение зависимости параметра C/R от температуры. Для этого термостат охлаждается до минимальной температуры $\approx 5 \text{ К}$. Затем включается нагреватель на постоянную мощность и с заданным шагом по температуре снимается зависимость температуры от времени, пока температура не возрастет до 300 К. Полученный файл обрабатывается для получения зависимости C/R от температуры. Весь температурный диапазон разбивается на промежутки, в которых C/R считается константой. Полученные данные сохраняются в файле.

3. Перемещение образца в заданном направлении на заданное число шагов с заданной скоростью. Программа используется для грубой ручной ориентации образца и при его смене.

4. Измерение и численная оценка спектральной плотности сигнала СКВИДа методом прямого преобразования Фурье для задаваемой полосы частот при стабилизированной температуре. Образец выставляется в одну из приемных катушек

магнитометра; температура стабилизируется около выбранного значения; после достижения стабильной температуры с выбранной частотой сбора производится набор сигнала СКВИДа по тактовым импульсам от блока шагового двигателя (образец неподвижен). Для задаваемых полос частот выше 18.2 Гц во время набора данных сигнала СКВИДа процесс измерения и стабилизации температуры с частотой 18.2 Гц отключается, чтобы не нарушить процесс сбора данных. Для поддержания температуры в относительно стабильном состоянии последние 1000 значений тока, подаваемых на нагреватель перед началом набора данных в режиме нормальной термостабилизации, запоминаются и циклически подаются на нагреватель с частотой опроса АЦП СКВИДа. Полученный массив из 2048 чисел обрабатывается с помощью быстрого преобразования Фурье.

5. Измерение временных зависимостей сигнала образца. Образец выставляется в одну из приемных катушек магнитометра; стабилизируется температура; вводится необходимое поле; затем при непрерывной стабилизации температуры производится измерение сигнала СКВИДа с необходимой частотой. Измерения могут проводиться сутки и более.

6. Измерение зависимости магнитного момента от температуры в режиме непрерывного нагрева (охлаждения). Образец выставляется в одну из приемных катушек магнитометра; устанавливается начальная температура; вводится необходимое поле; затем устанавливается непрерывный нагрев (охлаждение) и с определенным шагом по температуре измеряется сигнал образца. В основном такой режим измерения используется для сильно магнитных материалов (например, сверхпроводников), для которых температурный дрейф "нуля" установки не существен по сравнению с сигналом от образца.

7. Измерение температурной зависимости магнитного момента для слабомагнитных материалов. Образец выставляется в начальное положение (15 мм выше верхней приемной катушки) устанавливается начальная температура; вводится необходимое магнитное поле; производится измерение с движением образца

туда и обратно; полученная зависимость от координаты обрабатывается и определяется момент при данной температуре; затем температура стабилизируется около нового значения, определенного в массиве температур, и процедура измерения повторяется. Во время измерения момента при движении стабилизация температуры осуществляется тем же способом, что и в алгоритме 4.

8. Измерения сигнала СКВИДа при движении образца при стабилизированной температуре.

9. Измерения магнитного момента образца в зависимости от магнитного поля, заданного пользователем с помощью меню в виде массива данных. Образец выставляется в начальное положение (15 мм выше верхней приемной катушки); устанавливается стабильная температура; вводится необходимое магнитное поле; производится измерение с движением образца туда и обратно; полученная зависимость от координаты обрабатывается и определяется момент при данном магнитном поле; затем вводится новое магнитное поле из массива полей, и процедура измерения повторяется. Во время измерения момента при движении стабилизация температуры осуществляется тем же способом, что и в алгоритме 4.

10. Ориентация образца относительно приемных катушек магнитометра. При стабилизированной температуре производится измерение сигнала СКВИДа при движении образца во всем диапазоне движения; определяются координаты образца относительно приемных катушек; образец перемещается в необходимую точку (например, в исходную позицию для алгоритмов 7 и 9).

Основная программа называется LL_P.exe. При вызове она проводит начальную инициализацию оборудования и выводит на экран меню с предложением выбрать для дальнейшей работы один из готовых алгоритмов или выйти из программы. После выбора пользователь попадает в меню с параметрами выбранного алгоритма. Имеется 20 общих параметров, определенная часть которых представлена в меню каждого алгоритма. Их можно изменить прямо в меню и запустить конкретное измерение или выйти в общее меню. Для некоторых

алгоритмов одним из пунктов меню алгоритма является вызов еще одного меню, в котором происходит задание пользователем требуемого массива данных в удобном для него виде. А именно: начиная с требуемого номера он может задать элементы массива в виде строки вида "min:max:step", где min - значение элемента для первого требуемого номера, step - различие между соседними элементами, max - значение, которое нужно достичь на каком-то последующем элементе. Заданный массив существует до выхода из текущего алгоритма.

После выбора режима работы и запуска измерений на экран компьютера выводится текущее поведение температуры и задаваемых токов для нагревателя и холодильника. В нижней части экрана представлен список Hot keys с краткими пояснениями. После достижения требуемой температуры с заданной точностью в правом верхнем углу экрана рисуется закрашенный квадрат. После этого нужно либо нажать символ "B", если требуется участие пользователя для перехода к режиму измерений и он представлен в Hot keys, либо программа сама меняет режим измерений в соответствии с требованиями выбранного алгоритма. При этом переключение между картинками поведения температуры и сигнала СКВИДа (или магнитного момента) осуществляется нажатием символов "T" и "M". При нажатии символа "D" можно изменить шкалу измерений по вертикальной оси для текущей картинки. По окончании цикла измерений программа автоматически накапливает результаты в файле с выбранным именем.

Программное обеспечение магнитометра написано на языке Turbo Pascal 6.0 в объеме около 6000 строк и включает в себя вызывающую программу и набор программных модулей, которые могут быть разбиты на следующие функциональные группы:

1) модули с описаниями данных (константы, переменные, динамические массивы, к которым должны иметь доступ все модули для конкретных измерений);

2) модули для работы с аппаратурой (измерения и регулирование температуры образца, контроль магнитного поля, управление шаговым двигателем, средства проведения

измерений сигнала СКВИДа, начальная инициализация аппаратуры);

3) модули общего назначения (которые могут быть использованы и уже использовались в программах для других установок), содержащие средства поддержки типичных меню с возможностью изменения значений параметров в строках меню и средства для представления графиков функций в обычном и логарифмическом масштабе;

4) модули специального назначения для конструирования измерительных алгоритмов - средства для простого конструирования меню алгоритма (имеется около 20 общедоступных параметров, заголовки и значения которых могут быть помещены в меню конкретного алгоритма), поддержка стандартизованного сохранения результатов различных измерений, средства формирования отдельных меню для задания пользователем данных в виде массивов чисел, готовые средства для проведения измерений сигнала СКВИДа в каждом из трех вышеупомянутых режимов.

5) модули для численной обработки данных - вычисление спектральной плотности данных с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье, вычисление оптимального начального положения образца (для алгоритма 10).

Использование специально подготовленных программных средств для написания алгоритмов различных измерений обеспечивается соглашениями по их написанию. Каждый алгоритм написан как программный модуль (unit), в интерфейсной части которого фигурирует одна основная процедура без параметров. В части implementation должны быть описаны процедуры, опирающиеся на готовые программные средства: выбор данных и порядок сохранения их в файлах, конструирование меню алгоритма, обновление изменяющихся строк меню, вывод меню на экран и диалог с пользователем по поводу параметров и дальнейших действий. Основная процедура также опирается на готовые программные средства.

Программное обеспечение автоматизированной системы при работе занимает оперативную память в объеме 94К (из них 19К

требуются для динамических данных, 15К для статических данных, 8К - стек и 52К для кодовых сегментов). Существует вариант программы с оверлейной структурой для работы в интегрированной среде Turbo Pascal для версий DOS ниже 5.0 (интегрированная среда требует 73К памяти).

Программа имеет демонстрационную версию, которая имитирует сбор данных от аппаратуры в соответствии с ожидаемыми (для данного алгоритма измерений) данными со случайным шумом по температуре и сигналу СКВИДа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизированная система сверхпроводящего квантового измерителя малых магнитных моментов позволяет проводить сложные комплексные измерения, максимально используя все возможности магнитометра, получать оперативную информацию о ходе эксперимента, легко вводить новые алгоритмы экспериментальных процедур.

В заключение авторы выражают благодарность Б. В. Васильеву за постоянный интерес и помощь в работе, В. Ф. Бобракову, А. Н. Кузнецову, Ш. С. Зейналову, А. В. Блинову, И. А. Степановой за помощь в работе и ценные рекомендации.

Литература

1. Обухов Ю. В., Савельев Б. И., Ханин В. В. Портативный квантовый магнитометр, работающий в широком диапазоне температур, ПТЭ, №5, 1991, стр.166
2. Обухов Ю. В., Савельев Б. И. Сверхпроводящий квантовый измеритель малых магнитных моментов, Препринт ИАЭ-5393/10. М., 1991.
3. Георгиев А., Чуринов И. Н. Контроллер крейта КАМАК КК-009 для персональных компьютеров "Правец-16" и IBM PC/XT, препринт ОИЯИ, Р10-88-381, Дубна, 1988.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника, М. "Мир" 1982.

5. Шиков А. А., Панова Г. Х. Обработка на ЭВМ результатов прецизионных измерений температуры и теплоемкости в низкотемпературных экспериментах, препринт ИАЭ-2656. М., 1976.

6. Бобраков В. Ф., Васильев Б. В. СКВИД-интерферометр, Р13-85-20. Препринт ОИЯИ, Дубна, 1985.

7. Litvinenko E. I., Likhachev A. G. Software for computer-aided systems to perform experiments in the field of high- T_c superconductivity. Materials Science Forum, Vols 62-64 (1990) pp.207-210, Trans Tech Publications, Switzerland.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 апреля 1992 года.