

объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

3260 / 2-81

29/6-81

10-81-200

В.И.Дацков, И.Турзо, И.А.Шелаев, И.П.Юдин

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР
В ДИАПАЗОНЕ $4,2 \div 450$ К
С ПОМОЩЬЮ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ
СИСТЕМЫ В СТАНДАРТЕ КАМАК

Направлено в "ПТЭ"; на II симпозиум по микропроцессорам
и их применению. Будапешт, октябрь 1981 года.

1981

ВВЕДЕНИЕ

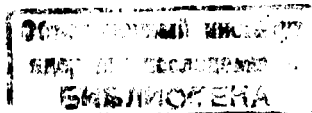
При создании модельного ^{/1/} синхротрона - ускорителя на сверхпроводящих магнитных элементах возникла необходимость измерения температуры обмоток диполей, линз, участков ионопровода в процессе вакуумных откачек с нагревом до 450 К и охлаждения до температуры кипения жидкого гелия 4,2К. Периодический контроль температуры в выбранных точках позволил исключить нежелательный перегрев отдельных элементов и обеспечить устойчивую динамику охлаждения и работу всей криогенной системы. Широкий диапазон измеряемых температур с требуемой точностью могут охватить температурные датчики на базе полупроводниковых диодов и терморезисторов ^{/2,3/}.

В настоящей работе в качестве датчиков температуры выбраны угольные резисторы типа ТВО /СССР/^{/4/}, параметры которых сравнимы с параметрами датчиков-резисторов фирмы Аллен Брэдли /США/, но с более широким рабочим диапазоном температуры; их свойства более подробно описаны в ^{/4/}.

Температура датчика определяется по измеренному сопротивлению резистора и вычислению по калибровочной зависимости $T=f(R)$. Каждый датчик обладает индивидуальной калибровочной зависимостью, поэтому при измерении температур в нескольких точках требуется выполнить множество арифметических вычислений для получения искомого представления температуры в К. Именно поэтому в системе измерения температуры было целесообразно использовать микропроцессор, что позволило полностью автоматизировать трудоемкие и часто долговременные температурные измерения.

1. ДАТЧИКИ

Применяемые в качестве термодатчиков резисторы типа ТВО конструктивно представляют собой стержни прямоугольной формы с аксиально запрессованными выводами. Объемный токопроводящий слой, состоящий из газовой сажи, борносвинцового стекла и корундового микропорошка, защищен стеклокерамической оболочкой ^{/5/}. В основном в качестве датчиков температуры применялись резисторы типа ТВО-0,125 с номиналом 1 кОм. На первом этапе было откалибровано и установлено 15 термодатчиков. В связи со сложными условиями работы термодатчика /вакуум, периодический



нагрев до 450 К, напряжение электрической изоляции датчик-объект не менее 500 В/ применена новая схема контактирования термодатчика с объектом через керамические конденсаторы. Все датчики соединены последовательно и запитываются от общего стабилизированного источника постоянным током 100 мкА с относительной стабильностью 10^{-5} . С каждого резистора по потенциальным проводам снималась разность потенциалов для последующего преобразования в температуру по калибровочной кривой $T = f(R)$.

2. АППРОКСИМАЦИЯ КАЛИБРОВОЧНОЙ КРИВОЙ

Для температурных датчиков на основе полупроводниковых диодов и терморезисторов разными авторами были предложены для определенных температурных диапазонов различные формулы описания зависимости $R=f(T)$ или $T=f(R)$ /6/.

Анализируя измеренные данные /см. табл. 1 и рис. 1/, можно предложить зависимость $T=f(R)$ в виде:

$$T = \sum_{n=0}^m C_n (R_0/R)^n \quad /1/$$

или

$$T = \sum_{k=0}^p C_k (R/R_0)^k \quad /2/$$

В формулах /1/ и /2/ $R_0 = 1000$ Ом с тем, чтобы R_0/R было близко к единице.

В настоящей работе для тщательно измеренных с помощью образцового германиевого термометра КГ 44Т-43 11 точек (R_i, T_i) /точность измерений лучше 0,5%/ по формулам /1/, /2/ и по формулам из /6/ методом наименьших квадратов были найдены коэффициенты C_n, C_k . Вычислительной обработке подвергалось 25 датчиков типа ТВО-0,125 /4/. Вычисления проводились на ЭВМ CDC-6500, БЭСМ-6 и ЕС-1040 на фортране, а также на микро-ЭВМ МERA-60 на языке BASIC.

Основная цель анализа - выбрать из формул /1/, /2/ и формул работы /6/ наиболее простую, т.е. ту, которая при небольшом /~ 5 ÷ 8/ числе коэффициентов давала бы небольшую ошибку $\Delta T = T - T_i$ на достаточно большом интервале температур. Это вызывалось необходимостью при работе используемой для определения температуры микро-ЭВМ быстрой обработки сигнала. Было предпочтительно использовать для определения температуры простые арифметические операции /+, -, ., // при минимальном требовании к объему ЗУ. /Для каждого датчика коэффициенты C_n, C_k сугубо индивидуальны; ввиду этого число зарезервированных ячеек ОЗУ при обработке сигнала от N датчиков, каждый из которых характеризуется M коэффициентами, равно $M \cdot N$./

Таблица 1

Датчик 1			Датчик 2			Датчик 3		
R (ом)	T _{изм.} (К)	T _{расч.} (К)	R (ом)	T _{изм.} (К)	T _{расч.} (К)	R (ом)	T _{изм.} (К)	T _{расч.} (К)
2894	4,19	4,19						
2836	4,33	4,33	2965	4,25	4,25	3142	4,25	4,25
2614	5,00	4,99	2738	4,86	4,85	2886	4,86	4,85
2378	6,01	6,02	2502	5,65	5,68	2623	5,65	5,68
2098	8,01	8,01	2185	7,40	7,38	2270	7,40	7,36
1932	10,00	9,99	1967	9,34	9,34	2026	9,34	9,35
1703	15,00	15,00	1847	10,96	10,97	1895	10,96	10,97
1582	19,84	19,85	1743	12,87	12,90	1784	12,87	12,88
1497	25,03	25,02	1716	13,55	13,52	1753	13,55	13,53
1186	77,40	77,40	1106	77,40	77,40	1108	77,40	77,40
		(77,29)			(77,40)			(77,40)
1146	92,00	91,03						
1125	102,00	101,19						
1071	134,00	136,60						
1034	165,00	168,59						
1015	185,00	187,47						
978	240,00	228,98	861,4	273,16	273,16	858,3	273,16	273,16
924	296,60	300,85	805,0	368,16	368,16	804,5	368,16	368,16

3. АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При работе с известной формулой /6/

$$T = \frac{K2^2 \cdot \ln R}{(\ln R - K1)^{1/a}} \quad a = 1/2 \quad /3/$$

для серии из 20 датчиков величины $K1, K2$ и a были следующие:

$$K1 \sim 6,80 \div 6,86,$$

$$K2 \sim 0,79 \div 0,98,$$

$$a \sim 0,49 \div 0,52,$$

для 18 и для 2 датчиков наблюдалось некоторое отличие / $K1_1 = 5,91$; $K2_1 = 2,04$; $a_1 = 0,275$; $K1_2 = 6,55$; $K2_2 = 1,15$; $a_2 = 0,39$ /. Формула /3/ применялась к диапазону $4 \leq T \leq 26$ К, причем для

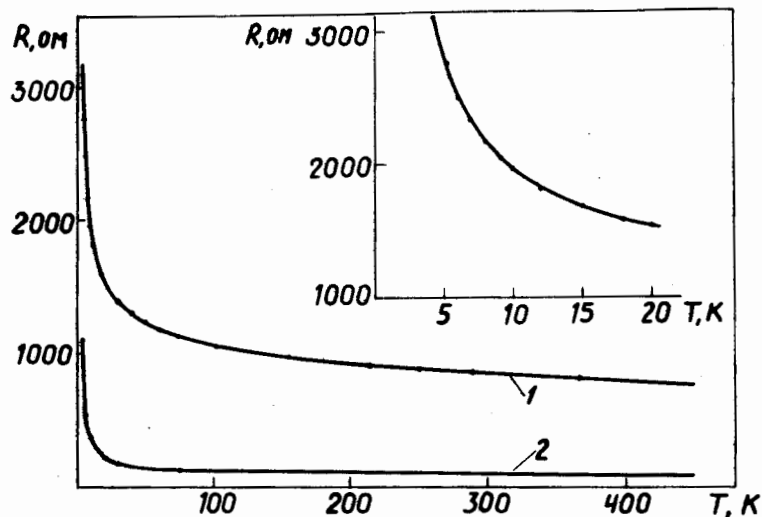


Рис.1. Кривая 1 - температурная зависимость сопротивления для резисторов типа ТВО $R_0/R_0 = 856 \text{ Ом/}$; вверху - участок низкотемпературной области. Кривая 2 - зависимость $T=f(R)$ для резисторов фирмы Аллен Брэдди.

$T=4,2 \text{ К}$ $\Delta T=0,001 \text{ К}$ и 26 К $\Delta T=0,2 \text{ К}$. Если расширить интервал до $T=77 \text{ К}$, то $\Delta T=60\%$.

Поэтому для широкого диапазона температур необходимо использовать зависимость $T=f(R)$ с числом коэффициентов >2 . Проведенный анализ показал, что для диапазона $4 \leq T \leq 450 \text{ К}$ и для точности $\Delta T=0,2 \text{ К}$ требуется 7 и более коэффициентов /для всех формул/. Наиболее удобным оказалось разбиение диапазона температур на две области: $4 \leq T \leq 77,4 \text{ К}$, где лучше использовать формулу /1/ с 5-ю коэффициентами, и для $77,4 \leq T \leq 450 \text{ К}$ формулу /2/ с 3-мя коэффициентами. Здесь точность аппроксимации $\Delta T_{\text{max}} = 0,06 \text{ К}$ / $\sim 1\%$ / для 12-го датчика $\Delta T_{\text{max}} = 0,45 \text{ К}$ / для первой области и $\sim 4,5\%$ для второй /см. табл. 2а и 2б/.

В точке $T=77,4 \text{ К}$ формулы /1/ и /2/ дают различие не более $0,2 \text{ К}$.

4. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Температура является одним из нескольких параметров, слежение за которыми является задачей стенда для испытания тактов сверхпроводящего ускорителя /8/.

Таблица 2а

$4,2 \leq T \leq 77,4 \text{ К}$

№ датч.	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	$\Delta T_{\text{max}}(\text{К})$
1	21,61	-201,71	781,21	-1301,95	892,13	0,01
2	5,08	-51,73	271,07	-508,68	409,21	0,03
3	1,72	-20,18	170,57	-366,01	337,64	0,03

Таблица 2б

$77,4 \leq T \leq 450 \text{ К}$

№ датч.	C_0	C_1	C_2	$\Delta T_{\text{max}}(\text{К})$
1	3606,02	-5699,06	2296,58	-11,02
2	3760,77	-6578,80	2937,11	0
3	4022,51	-7144,94	3234,99	0

Требования к аппаратуре следующие:

- а/ измерение температуры в диапазоне $4,2 \div 77,4 \text{ К}$ с точностью около 1% .
- б/ измерение температуры в диапазоне $77,4 \div 450 \text{ К}$ с точностью около 5% ,
- в/ результаты представить в виде таблицы в К ,
- г/ опрос всех 15 измерительных точек минимально 1 раз/мин,
- д/ аппаратура должна позволять менять число измерительных точек и алгоритм вычисления калибровочной кривой.

На основе перечисленных требований аппаратура была выполнена, в согласии со стандартом КАМАК /9/, с управлением от автономного контроллера крейта на базе микропроцессора Intel 8080A /10/. Система обладает следующими основными параметрами: пропускная способность 25 Кбайт/с , объем памяти 28 Кбайт с возможностью расширения до 64 Кбайт /11/. Блок-схема аппаратуры приведена на рис. 2.

Датчики опрашиваются по очереди с 1 по 15 со скоростью отсчета $0,75 \text{ отсчета/с}$ и посредством мультиплексора /АГМ/ подключаются к измерителю /АЦП/ /12/. В каждом цикле измерения проверяется программным образом постоянство величины калибровочного тока $I_{\text{калибр}}$ питающего датчики. В случае ухода за предел $\pm 0,5\%$ оповещается оператор. Если ток $I_{\text{калибр}}$ удовлетворяет требованиям, начинается опрос датчиков при одновременном вычислении величины температуры на основании калибровочной зависимости $T=f(R)$, формулы /1/ и /2/.

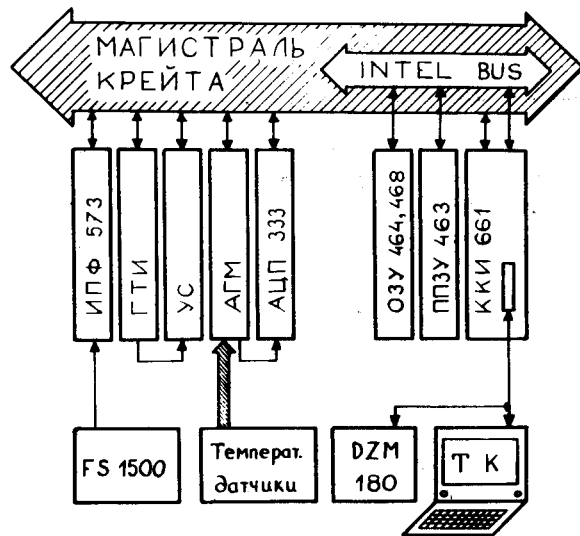


Рис.2. Блок-схема аппаратуры. ИФФ - интерфейс перфопоратора-фотосчитывателя, тип 573, ГТИ - генератор тактовых импульсов TESLA, NL2402, УС - установочный счетчик KFKI, CAM.2.04, АГМ - аналоговый гирконовый мультиплексор, АЦП - аналого-цифровой преобразователь, тип 333, ОЗУ - оперативное ЗУ /24 Кбайт/, тип 464 и 468, ППЗУ - постоянное перепрограммируемое ЗУ /4 Кбайт/, тип 463, ККИ - автономный контроллер крейта, тип 661.

В программе для вычисления температуры T и для выдачи данных на дисплей или цифропечать используется библиотека стандартных арифметических подпрограмм^{/11/}. Программа содержит также часы реального времени /ГТИ, УС/, которые фиксируют время измерения относительно начала работы программы.

Данные представлены на дисплей в виде таблицы в форме, привычной для арифметики с плавающей запятой: $\pm XXX E \pm XX$. Первая позиция таблицы выделена для величины тока $I_{\text{калибр.}}$ и остальных 15 позиций для показаний температуры с датчиков. Упрощенная блок-схема программы показана на рис. 3.

5. ИЗМЕРЕНИЕ - ПРОВЕРКА АППАРАТУРЫ

Датчики - терморезисторы типа ТВО - подбирались из одной партии количеством 50 штук, из которых, принимая во внимание главным образом стабильность, было отобрано 20 датчиков. На основании калибровки датчиков были вычислены на ЭВМ CDC-6500

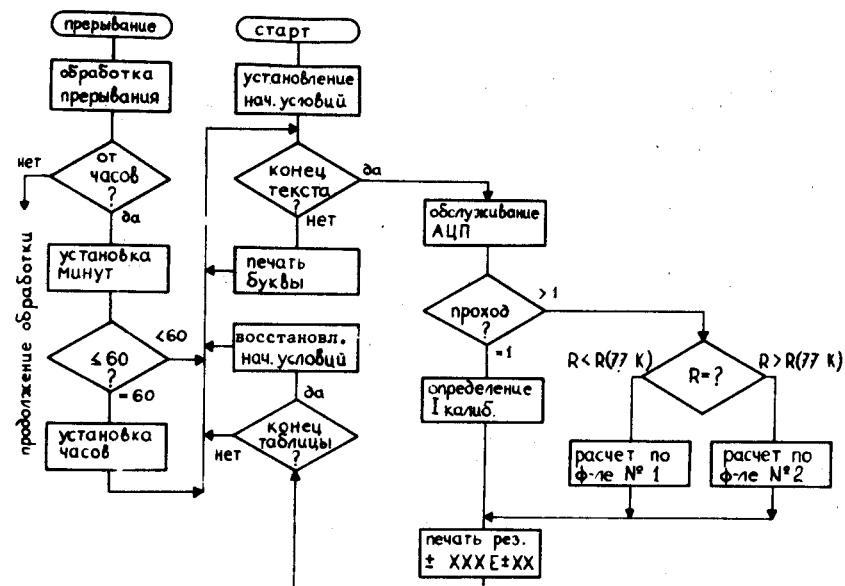


Рис.3. Упрощенная блок-схема программы.

коэффициенты C_n, C_k для формул /1/ и /2/. Результаты измерения трех произвольно выбранных датчиков собраны в табл. 3 и 4.

Из табл. 3 видно, что в диапазоне $4,2 \text{ K} \leq T \leq 77,4 \text{ K}$ измеряем температуру в контрольных точках со средней точностью для всех датчиков $\sim 0,5\%$ и в диапазоне $77,4 \text{ K} \leq T \leq 368 \text{ K}$ с точностью $\sim 5\%$, что достаточно. Графа $T_{\text{расч.}} [K]$ определяет точность калибровки и определения коэффициентов C_n, C_k в формулах /1/ и /2/.

Таблица 3

$T [K]$	4,28	77,4	77,4	273,8	291,3	368
$T_{\text{расч.}} [K]$	4,2802	77,4	77,4	273,8	291,3	368,0
$T_{\text{изм.}} [K] 1$	4,24	77,2	77,0	276	290	365
2	4,28	76,8	77,5	270	301	369
3	4,25	77,3	77,0	291	297	368
$\Delta T [K]$	0,02	0,4	0,45	4,6	5,5	1,0
$\Delta T_{\text{макс}} [K]$	0,04	0,7	0,9	7,2	9,7	3,0
$\Delta T [\%]$	0,47	0,51	0,58	1,68	1,89	0,27
$\Delta T_{\text{макс}} [\%]$	0,93	0,90	1,16	2,63	3,33	0,82
Расч. формула	(1)			(2)		

Таблица 4

Дата	6.2.1981			9.2.1981							
† [ч:мин]				0:04	0:13	0:21	0:26	0:27	2:15	3:21	
Т _{изм.} [К]	1	4,24	77,2	77,0	77,2	4,24	4,24	77,2	77,0	77,0	77,0
	2				76,8	4,28	4,28	76,8	77,5	77,5	77,5
	3				77,3	4,25	4,25	77,3	77,0	77,0	77,0
T [К]	4,28	77,4	77,4	77,4	4,28	4,28	77,4	77,4	77,4	77,4	
Формула	(1)	(2)		(1)			(2)				

Таблица 4 демонстрирует стабильность показаний датчиков: долговременную /датчик 1-3 дня/ и кратковременную. Заметим, что калибровка датчиков была сделана в феврале 1980 г., причем показания относительно $T_{расч.}$ в двух точках / $T=4,28; 77,4$ / повторились в феврале 1981 г. со средней точностью $\sim 0,5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, 9-12346, Дубна, 1979.
2. Кривоносов А.И. Полупроводниковые датчики температуры. "Энергия", М., 1974.
3. Яншак Л. ОИЯИ, 13-80-113, Дубна, 1980.
4. Дацков В.И. ОИЯИ, 8-80-213, Дубна, 1980.
5. Марюнов К.И., Зайцев Ю.В. Технология производства резисторов. Изд. "Высшая школа", М., 1972.
6. Менке Х., Цвинева Г.П. ОИЯИ, P8-9055, Дубна, 1975.
7. Clement, Quinell. Rev.Sci.Instr., 1952, v.23, p. 213.
8. Турзо И., Шелаев И.А. Стенд для испытания сверхпроводящих магнитов с микропроцессорным управлением. В кн.: "X симпозиум по ядерной электронике", Дрезден, 1980, с. 15.
9. A Modular Instrumentation System for Data-Handling, EUR 4100e, ESONE Committee, 1972.
10. Немеш Т. ОИЯИ, 10-12106, Дубна, 1979.
11. Немеш Т. и др. ОИЯИ, 10-12077, Дубна, 1979.
12. Басиладзе С.Г., Маньяков П.К. ОИЯИ, 13-11680, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 марта 1981 года.