

X - 68

10-82-593

Хоанг Као Зунг

АППАРАТУРНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА  
ДЛЯ СТЕНДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПАРАМЕТРОВ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ  
И СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика  
(технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

КОЛПАКОВ  
Игорь Филиппович

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук,  
профессор

МАТАЛИН-СЛУЦКИЙ  
Лев Александрович

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

ИНКИН  
Виктор Дмитриевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры  
им. Д.В.Фурьева (Ленинград).

Защита диссертации состоится " 9 " IX 1982 г. в  
11 часов на заседании специализированного совета Д-047.01.02  
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " 9 " VIII 1982 г.

Ученый секретарь специализированного  
совета

М.Ф. ЛИХАЧЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследования в области сверхпроводимости интенсивно проводятся в течение последних двух десятилетий. За это время сверхпроводники нашли широкое применение в экспериментальной ядерной физике, в первую очередь в физике высоких энергий. Был разработан ряд моделей сверхпроводящих магнитов, в частности, магнитов, используемых в ускорительных установках физики высоких энергий.

Одной из задач экспериментальных исследований сверхпроводимости является измерение криогенных и магнитных параметров, что необходимо для изучения свойств сверхпроводников и для испытаний сверхпроводящих магнитов. При этом требуется обеспечить как заданную точность, так и высокую производительность работ по проведению измерений. Последняя особенно важна при быстрой диагностике свойств сверхпроводников, или когда измерения выполняются на большом количестве образцов сверхпроводников.

Цель работы. Диссертация посвящена решению задачи создания систем измерений параметров сверхпроводящих магнитов и сверхпроводников. Применение таких систем позволяет повышать точность измерений и существенно сокращать время проведения экспериментов. Целью работы явились также разработка и создание аппаратных и программных средств сбора и обработки данных на линии с ЭВМ, предназначенных для использования в криогенных экспериментах. Работа велась в рамках исследований, проводимых по теме "Нуклотрон" (сверхпроводящий ускоритель релятивистских ядер) в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ в период с 1977 по 1982 гг.

Методика проведения исследования. Для решения поставленных задач использовался математический аппарат теории информации, теории вероятности и математической статистики, а также методические основы создания программно-модульных систем и критерии их оценки, позволяющие оптимизировать выбор типовых решений структурных схем системы. Практическая часть диссертации основывалась на использовании мини- и микро-ЭВМ, модулей и устройств обмена в стандарте КАМАК.

Научная новизна диссертации заключается в разработке методики создания систем сбора и обработки данных для измерений криогенных и магнитных параметров. Впервые в странах-участницах ОИЯИ была создана система на линии с ЭВМ, использованная для исследования параметров сверхпроводящих импульсных магнитов и сверхпроводящих проводов и кабелей. Разработаны аппаратные средства и программное обеспечение системы для проведения экспериментов по измерению потерь энергии, коэффициента теплопроводности и теплоемкости сверхпроводящих

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

ников и сверхпроводящих магнитов. Созданы аппаратурные средства обеспечения криогенных экспериментов по исследованию поляризации ионов.

**Практическая ценность результатов работы.** Результаты теоретического анализа характеристик систем сбора и обработки данных, используемых для измерений параметров сверхпроводников, применимы при проектировании подобных систем. Разработанные автором аппаратурные и программные средства были использованы в экспериментах по измерению ряда параметров сверхпроводящих магнитов и сверхпроводников. На основании этих измерений были сформулированы требования к технологии изготовления сверхпроводящих кабелей и сверхпроводящих магнитов с целью их использования в экспериментальных установках физики высоких энергий. Ряд аппаратурных решений, заложенных при исследовании сверхпроводников, был успешно использован в других системах сбора и обработки данных в ЛВЭ ОИЯИ и в Институте атомной энергии им. И.В.Курчатова (Москва).

**Реализация результатов работы.** Предложенная методика создания систем измерений была реализована в стендовой системе измерений параметров сверхпроводящих магнитов и сверхпроводников, а также в системе сбора и обработки данных источника поляризованных ионов ЮЛЯ-РИС<sup>ж</sup>. Разработанные аппаратурные и программные средства были использованы в системах, установленных в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на Симпозиуме по применению микро-ЭВМ и микропроцессоров (Будапешт, 1979 г.), на X Международном симпозиуме по ядерной электронике (Дрезден, 1980 г.), на Международной школе по вопросам применения ЭВМ в физическом эксперименте (Алушта, 1981 г.) и опубликована в препринтах и сообщениях ОИЯИ.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 106 страниц машинописного текста, в том числе 28 рисунков, 13 таблиц, 4 приложения и библиографический список литературы из 75 наименований.

**Структура работы.** Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель и изложены новые результаты, полученные автором.

В первой главе "Вопросы создания систем сбора и обработки данных для измерений криогенных и магнитных параметров" приведен теоретический анализ характеристик отдельных элементов системы, в частности, характеристик некоторых основных криогенных и магнитных параметров. На основании полученных результатов анализа была составлена типовая структурная схема системы измерений параметров сверхпроводя-

щих магнитов и сверхпроводников. Приведена оценка надежности системы и затрат на ее создание.

Вторая глава "Система сбора и обработки данных для измерения параметров сверхпроводящих магнитов и сверхпроводников" посвящена практической реализации системы, созданной в стандарте КАМАК на базе ЭВМ ТРА-70 и предназначенной для измерения величины динамических потерь энергии в сверхпроводящих импульсных магнитах и коротких образцах сверхпроводящих кабелей. Приведено описание структуры, функционирования и математического обеспечения системы. Описан расширенный вариант этой системы, использованный для исследования теплопроводности и теплоемкости сверхпроводящих проводов и кабелей. Приведен результат применения микропроцессоров для изучения потерь энергии в сверхпроводниках и обоснована целесообразность использования микро-ЭВМ в таких экспериментах.

Третья глава "Аппаратурные и программные средства обеспечения криогенных экспериментов" посвящена разработке аппаратурных и программных средств, используемых для сбора и обработки данных криогенных экспериментов.

В приложениях представлены технические характеристики разработанных автором аппаратурных средств.

**Содержание работы.** Оптимальная структурная конфигурация систем измерений параметров сверхпроводников определяется на основании результатов анализа отдельных элементов систем. В состав каждой системы входят: источники информации от объекта исследования, приемники информации, устройство обмена и источник программ. Объем исследования включает в себя как изучаемые сверхпроводники, так и все измерительное оборудование. Основными его характеристиками являются число каналов измерения, временные характеристики (шаг стробирования, время измерения) и поток информации. На основе этих характеристик сформулированы конкретные требования к величине пропускной способности устройства обмена и емкости буферной памяти источника программ.

Главное внимание при анализе уделено определению временных зависимостей криогенных и магнитных параметров. Были использованы метод аппроксимации при линейной и ступенчатой интерполяции и метод наименьших квадратов. Показано, что при заданной погрешности измерения шаг стробирования и допустимая среднеквадратичная погрешность определения величины исследуемого параметра являются взаимозависимыми и зависят от значения коэффициента аппроксимации  $\alpha$ . На рис. I представлена зависимость шага стробирования от этого коэффициента при различных значениях погрешности измерения для линейной функции, описывающей закон изменения тока в сверхпроводящем магните.

<sup>ж</sup> Belushkina A.A. et al. JINR, E13-80-500, Dubna, 1980.

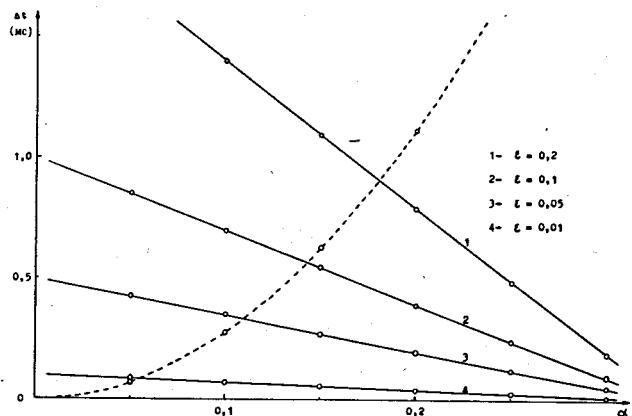


Рис. 1. Зависимость шага стробирования от коэффициента аппроксимации для линейной функции при ступенчатой интерполяции (сплошные линии) и при использовании метода наименьших квадратов (пунктир).

При известных значениях шага стробирования и допустимой средне-квадратичной погрешности проведено вычисление потока информации, поступающего в устройство обмена. На рис. 2 показана зависимость потока информации от заданной погрешности измерения для экспоненциальной функции, описывающей закон изменения температуры образца сверхпроводника при определении его коэффициента теплоемкости.

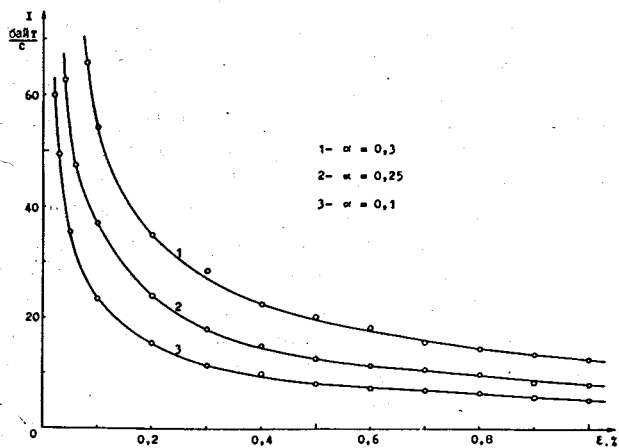


Рис. 2. Зависимость потока информации от погрешности измерения для экспоненциальной функции.

Далее в работе рассмотрена методика измерений ряда основных криогенных и магнитных параметров, таких как температура, магнитное поле, динамические потери энергии и др. Для каждого из них проведено вычисление значений основных характеристик. Общее значение характеристик рассмотренных параметров представлено в табл. 1.

Таблица 1. Общее значение характеристик криогенных и магнитных параметров

Характеристики	Значение
Поток информации, кбайт/с	$\leq I_5$
Время измерения, с	$0,1 + I_0$
Число каналов измерения	$I_5 + 20$
Емкость буферной памяти, кбайт	$\leq I_6$

По результатам анализа была составлена типовая структурная схема системы измерения параметров сверхпроводящих магнитов и сверхпроводников. Выбор устройства обмена осуществляется по следующим критериям: пропускная способность, вместимость, затраты на сопряжение. Кроме того, для обеспечения возможности дальнейшего расширения и развития системы желательно использовать модульный принцип построения этого устройства. Исходя из таких соображений в качестве устройства обмена был выбран крейт КАМАК.

Источником программ может быть любой тип ЭВМ, который имеет оперативную память емкостью не менее 16 кбайт и математическое обеспечение, необходимое для обработки данных. Выбор типа ЭВМ определяется как величиной допустимых затрат на нее, так и ее надежностью. С этой точки зрения лучшие показатели имеет мини- или микро-ЭВМ.

По величине затрат и надежности отдельных элементов системы можно сделать оценку по надежности системы и затратам на ее создание.

Была реализована система сбора и обработки данных с аппаратурой в стандарте КАМАК на базе мини-ЭВМ ТРА-70, предназначенная для измерения величины динамических потерь энергии в сверхпроводниках  $I^2$ . В работе приведено описание ее структуры, функционирования и программного обеспечения. Структурная схема системы показана на рис. 3. Система обеспечивает измерение потерь энергии с точностью не хуже 1% при испытании коротких образцов сверхпроводящих кабелей и 5% при испытании сверхпроводящих магнитов.

Программное обеспечение системы  $I^2$  содержит программу-диспетчер, осуществляющую управление процессом измерения и сбор данных, и программы обработки данных. Все программы написаны на языке ассемблер ЭВМ ТРА-70. Они занимают не более 5К 16-разрядных слов оператив-



ной памяти ЭВМ, из которых 4К выделено для пакета стандартных библиотечных программ, входящего в состав базового математического обеспечения ЭВМ ТРА-70.

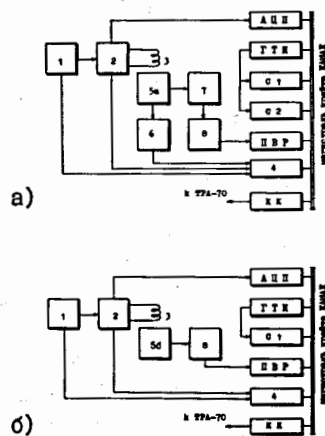


Рис. 3. Структурная схема системы измерения потерь энергии в сверхпроводящих кабелях (а) и импульсных магнитах (б): I - программатор для источника тока, 2 - источник тока, 3 - сверхпроводящий магнит, 4 - блок управления, 5а - газгольдер, 5б - джоульметр, 6 - датчик объема газа в газгольдере, 7 - датчик температуры входящего в газгольдер газа гелия, 8 - цифровой вольтметр. АЦП - аналого-цифровой преобразователь, ГТИ - генератор тактовых импульсов, С - счетчик, ПВР - параллельный входной регистр, КК - специализированный контроллер крейта.

Структурная схема разработанного программного обеспечения системы представлена на рис. 4а. На рис. 4б показана принципиальная схема статусного регистра, с помощью которого осуществляется синхронизация работы программ.

Измерения потерь энергии в сверхпроводниках проводятся в различных режимах испытания, которые определяются значением параметров тока в сверхпроводящем магните, таких как амплитуда тока, скорость его нарастания и спада, длительность паузы между импульсами тока и т.д. До начала измерений значение этих параметров задают как исходные условия эксперимента. Ранее задание исходных условий осуществлялось вручную с помощью программатора источника тока питания сверхпроводящего магнита (см. рис. 3).

Для дальнейшего развития системы была реализована возможность автоматического управления заданием исходных условий эксперимента. Был разработан ряд средств, с помощью которых можно менять значение параметров тока магнита после каждого цикла измерений и проводить испытание сверхпроводников практически непрерывно.

Система измерений потерь энергии была расширена для использования в экспериментах по исследованию теплопроводности и теплоемкости сверхпроводящих проводов и кабелей<sup>3/</sup>. Структурная схема такого варианта системы показана на рис. 5. В этом варианте подвергается изменению только измерительная часть системы, а ее вычислительная

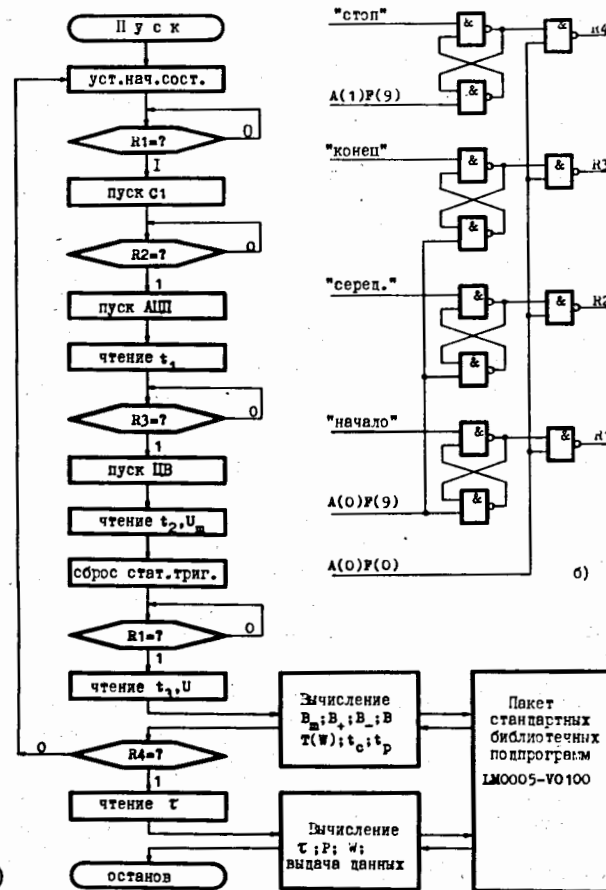


Рис. 4. а) Структурная схема программного обеспечения системы измерений потерь энергии; б) принципиальная схема статусного регистра, используемого для синхронизации работы программ.

часть остается прежней. В диссертации приведено описание последовательности работы и программного обеспечения этого варианта системы.

Далее рассмотрены возможности применения микро-ЭВМ МИСКА, разработанной в ЛВЭ ОИЯИ, в экспериментах по измерению параметров сверхпроводников. Микро-ЭВМ создана в стандарте КАМАК на базе микропроцессора ИНТЕЛ-8080. Конфигурация системы на базе данной микро-ЭВМ при измерении динамических потерь энергии в сверхпроводящих

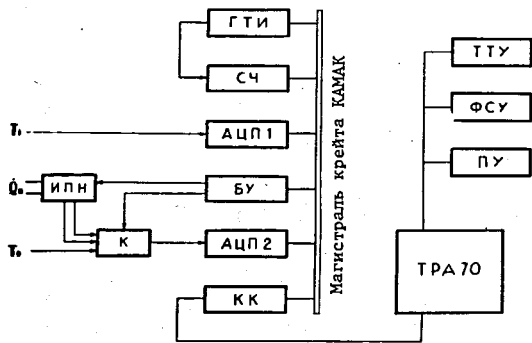


Рис. 5. Структурная схема системы измерений теплопроводности и теплоемкости сверхпроводников. ИПН - источник питания нагревателя, К - коммутатор, БУ - блок управления, ТТУ - телетаип, ФСУ - фотосчитыватель, ПУ - перфоратор.

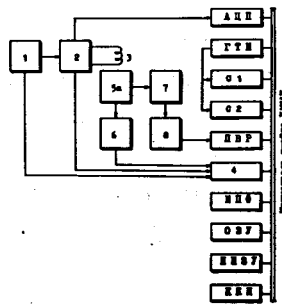


Рис. 6. Конфигурация системы на базе микро-ЭВМ в стандарте КАМАК при измерении потерь энергии в сверхпроводящих магнитах. ККИ - автономный контроллер крейта, созданный на базе микропроцессора ИНТЕЛ-8080; ИФ - интерфейс периферийных устройств.

магнитах приведена на рис. 6<sup>4/</sup>. Показано, что характеристики микро-ЭВМ удовлетворяют требованиям по точности, производительности и возможности функционального расширения систем, предназначенных для исследования параметров сверхпроводников. Кроме того, использование микро-ЭВМ в системах сбора и обработки данных позволяет улучшить такие характеристики системы, как надежность

и затраты на ее создание. Таким образом, применение микро-ЭВМ в подобных системах является целесообразным.

Для сбора и обработки данных криогенных экспериментов был разработан ряд аппаратных и программных средств.

Управляемый от ЭВМ программатор источника тока питания сверхпроводящих магнитов<sup>5,6/</sup> предназначен для проведения на линии с ЭВМ экспериментов по изучению свойств сверхпроводников. Структурная схема программатора показана на рис. 7. Он представляет собой задающий генератор импульсов напряжения трапецеидальной или треугольной формы, значение параметров которых (амплитуда, скорость нарастания и спада, длительность паузы) можно задавать как вручную, так и с помощью ЭВМ. Использование программатора в системах, работающих на линии с ЭВМ, позволяет проводить эксперименты практически непрерывно, так как до начала эксперимента можно запрограммировать в ЭВМ все данные о значении параметров выходных импульсов программатора, определяющие режимы испытания сверхпроводников.

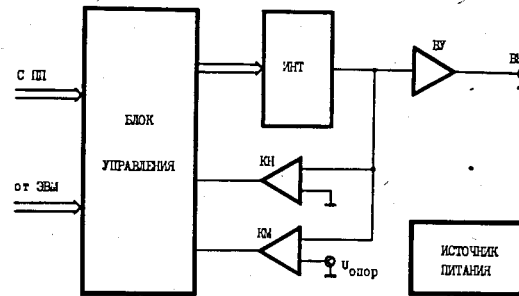


Рис. 7. Структурная схема программатора. ИНТ - интегратор, КН - компаратор нуля, КМ - компаратор максимума, ВУ - выходной усилитель.

из которых включает в себя 11-разрядный буферный регистр, 2-декадный реверсивный счетчик, схему выбора частоты тактовых импульсов и схему управления выдачей выходных сигналов. Отличительным элементом модуля является наличие в каждом канале буферного регистра, благодаря которому можно осуществлять многократный запуск таймера без перезаписи данных в него.

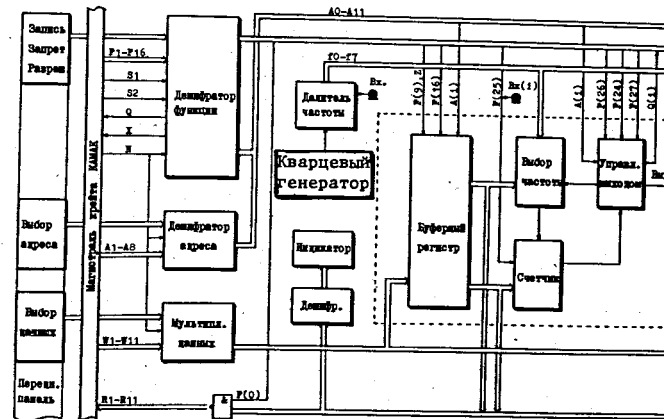


Рис. 8. Функциональная схема 12-канального программируемого таймера. Блок-схема одного канала выделена пунктиром.

Организация работы 2-кредитной системы сбора и обработки данных, используемой на установке ПОЛЯРИС на линии с ЭВМ типа LSI-11, "ЭЛЕК-

ТРОНИКА-60" и МЕРА-60 осуществляется с помощью модуля драйвера ветви КАМАК ИВМ-861<sup>8/</sup>. Функциональная схема модуля показана на рис. 9.

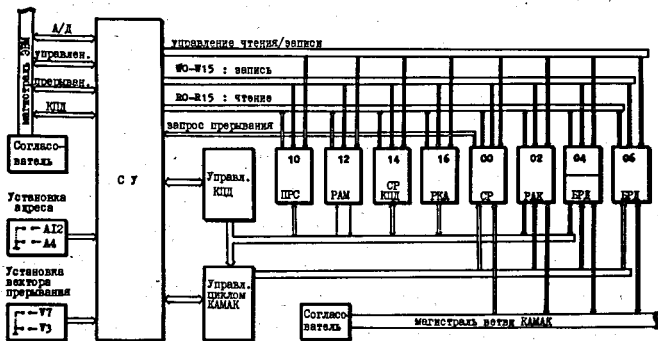


Рис. 9. Функциональная схема драйвера ветви КАМАК ИВМ-861 СУ - узел сопряжения с магистралью ЭВМ.

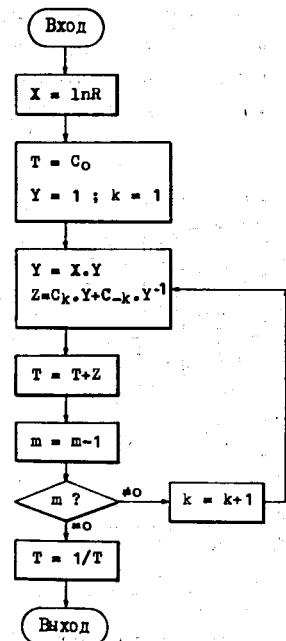


Рис. 10. Структурная схема алгоритма программы TEMPO<sup>9/</sup>.

Драйвер ветви позволяет передавать данные как по программному каналу со скоростью 50 К 16-разрядных слов в секунду, так и по каналу прямого доступа в память со скоростью 500 К слов/с.

Далее приведено описание программ обработки данных, которые наиболее часто используются в экспериментах по измерению параметров сверхпроводников<sup>9/</sup>. Программы составлены для ЭВМ ТРА-70 и отражают специфику аппаратных средств, применяемых в таких экспериментах.

Программа TEMPO осуществляет вычисления температуры T по значению сопротивления R термодатчика по формуле

$$T = \left[ \sum_{k=-m}^m C_k (\ln R)^k \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $C_k$  - константы, соответствующие применяемому термодатчику. Алгоритм программы представлен на рис. 10.

Программа PROPAP используется для управления программатором источника тока питания сверхпроводящих магнитов. С ее помощью на выходе программатора можно полу-

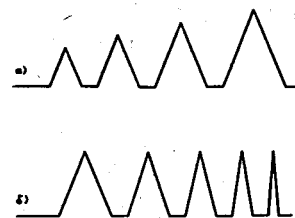


Рис. 11. Форма сигнала на выходе программатора, управляемого от ЭВМ с помощью программы PROPAP, с линейно возрастающей амплитудой (а) или скоростью нарастания и спада (б).

чить серию импульсов с линейно изменяющейся амплитудой и/или скоростью нарастания и спада (см. рис. 11).

Программа RESIST выполняет вычисление величины сопротивления R термодатчика при известном значении температуры T по формуле

$$R = \exp \left\{ \frac{1}{2C_1 T} \left[ (1 - C_0 T) + \sqrt{(1 - C_0 T)^2 - 4C_1 C_{-1} T^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $C_0$ ,  $C_1$  и  $C_{-1}$  - константы.

#### Выводы и основные результаты работы

1. Выполнен анализ структуры систем сбора и обработки данных и задач, решаемых в системах измерения криогенных и магнитных параметров. На основе анализа предложена методика организации систем в стандарте КАМАК на базе мини- или микро-ЭВМ, предназначенных для использования в экспериментах по измерению параметров сверхпроводящих магнитов и сверхпроводников.

2. Разработана и создана система сбора и обработки данных для измерения величины динамических потерь энергии в сверхпроводящих магнитах и коротких образцах сверхпроводящих кабелей. Подобная система была создана впервые в странах-участницах ОИЯИ.

3. Применен расширенный вариант системы на линии с ЭВМ ТРА-70 для проведения измерений коэффициента теплопроводности и теплоемкости сверхпроводящих проводов и кабелей.

4. Разработано программное обеспечение ЭВМ ТРА-70 для управления ходом эксперимента, сбора и обработки данных при измерении вышеупомянутых параметров сверхпроводников.

5. Разработаны аппаратные средства обеспечения экспериментов по исследованию динамических потерь энергии. В частности, впервые в странах-участниках ОИЯИ был создан управляемый от ЭВМ программатор для источника тока питания сверхпроводящих магнитов, позволяющий проводить эксперименты практически непрерывно.

6. Применена микро-ЭВМ в стандарте КАМАК в системе измерений динамических потерь энергии. Обоснована целесообразность использования микро-ЭВМ в таких экспериментах.

7. Разработан ряд модулей в стандарте КАМАК для использования в системе криогенной установки ПОЛЯРИС. Эти модули также могут найти широкое применение в других системах сбора и обработки данных.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Хоанг Као Зунг, Хованец Ф., Яншак Л. Система на линии с ЭВМ ТРА-70 в стандарте КАМАК для измерения динамических потерь в сверхпроводящих магнитах и кабелях. - Дубна, 1979. - 10 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн. исслед.: IO-I2316).
2. Хоанг Као Зунг. Программное обеспечение системы на линии с ЭВМ ТРА-70 для измерений потерь энергии в сверхпроводниках. - Дубна, 1979.- 8 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.: IO-I2344).
3. Херцог Р., Хоанг Као Зунг, Яншак Л. Система на линии с ЭВМ ТРА-70 для измерения теплоемкости и теплопроводности сверхпроводящих материалов. - В кн.: Труды X Международного симпозиума по ядерной электронике. - Дрезден, ГДР, 1980, т. I, с. 54-56.
4. Хоанг Као Зунг, Хованец Ф., Яншак Л. Микропроцессорная автономная система в стандарте КАМАК для измерений потерь энергии в сверхпроводящих кабелях и импульсных магнитах. - В кн.: Труды симпозиума по применению микро-ЭВМ и микропроцессоров. - Буцапешт, 17-19 октября 1979, т. II, с. 681-687.
5. Хоанг Као Зунг, Яншак Л. Управляемый от ЭВМ программатор для источника тока. - Дубна, 1981. - 4с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: PI3-8I-IOI).
6. Хоанг Као Зунг. 4-канальный ЦАП, управляющий программатором источника тока питания сверхпроводящих магнитов. - Дубна, 1981.- 4 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: IO-8I-545).
7. Хоанг Као Зунг, Шутов В.Б. I2-канальный программируемый таймер.- Дубна, 1981.- 4 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.:I3-8I-708).
8. Смирнов В.А., Хоанг Као Зунг. Организация ветви КАМАК на линии с микро-ЭВМ LSI-11, "ЭЛЕКТРОНИКА-60" и MECA-60. - Дубна, 1981.- 9 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн.исслед.: IO-8I-528).
9. Хоанг Као Зунг. Подпрограммы управления и обработки результатов криогенных измерений для ЭВМ ТРА-70. - Дубна, 1981. - 5 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядер. исслед.: IO-8I-830).

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 августа 1982 года.