

Т-872

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

10-84-91

ТУРЗО Иван

**ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ
И УПРАВЛЕНИЯ ЦИКЛОМ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СИНХРОТРОНА**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Дубна 1984

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор технических наук
старший научный сотрудник

Игорь Филиппович
КОЛПАКОВ

доктор технических наук
старший научный сотрудник

Игорь Александрович
ШЕЛАЕВ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
профессор

Лев Александрович
МАТАЛИН-СЛУЦКИЙ

кандидат технических наук

Владимир Николаевич
АНОСОВ

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

Защита диссертации состоится 11.30 "29" марта 1984 г. в 11.30 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 "27" февраля 1984 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

М.Ф. ЛИХАЧЕВ

Актуальность. Ускорители элементарных частиц со сверхпроводящей магнитной системой являются в настоящее время основной альтернативой для достижения все более высоких энергий ускоряемых частиц. Разработка и создание ускорителей со сверхпроводящей магнитной системой ведется в крупнейших физических лабораториях. В Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований создается сверхпроводящий синхротрон, представляющий собой модель ускорительного комплекса ионов высоких энергий Нуклотрон. Создание модельного сверхпроводящего синхротрона позволит использовать накопленный опыт его эксплуатации при разработке Нуклотрона, а также в будущем модельный синхротрон может служить его инжектором.

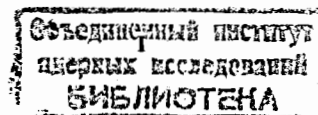
Автоматизация диагностики и управления является необходимым составным элементом процесса создания и эксплуатации ускорителя. Ускоритель является сложным объектом, который насчитывает несколько тысяч измерительных и управляющих каналов. Его работа описывается сложными временными соотношениями и алгоритмами, выполнение которых необходимо в реальном времени. Одновременно с измерениями и управлением ведется мониторингирование и запись большого числа параметров для последующего анализа с целью повышения эффективности работы ускорителя.

Автоматизированная система измерений и управления является поэтому необходимой частью ускорительного комплекса. В диссертации рассмотрены вопросы создания автоматизированной системы ускорителя, связанные в основном с использованием сверхпроводящей магнитной системы.

Работа велась в соответствии с тематическим планом в рамках проекта Нуклотрон в течение 1979-1983 годов в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Цель работы является решение некоторых вопросов создания аппаратурных и программных средств для испытания отдельных частей ускорителя со сверхпроводящей магнитной системой. Для этой цели создана система автоматизированной проверки магнитной оптики, конструкции ионопровода и криостата на стенде трех регулярных периодов, система для проверки источников питания сверхпроводящей магнитной системы и программное обеспечение для автоматизированной системы охладителя большой мощности. На основе полученного опыта предложена структурная схема автоматизированной системы модельного сверхпроводящего синхротрона.

Научная новизна выполненной работы состоит в том, что впервые в странах-участницах ОИЯИ были решены некоторые вопросы автоматизации сверхпроводящего синхротрона, а именно: впервые в странах-участницах



ОИЯИ создано программное обеспечение для автоматизированной системы измерения и управления ожигателем гелия мощности 1600 Вт типа КГУ 1600/4,5, применено управление от микро-ЭЭМ для источников питания тока сверхпроводящей магнитной системы, использована микропроцессорная техника для термометрических измерений и разработана соответствующая методика.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что создание автоматизированной системы для стенда способствовало запуску трех периодов сверхпроводящего синхротрона, позволило решить вопросы улучшения конструкции криостата ускорителя, что, в конечном итоге, подготовило создание модельного синхротрона. Созданное программное обеспечение автоматизированной системы гелиевого ожигателя способствовало успешному запуску крупнейшего в Европе завода жидкого гелия. Программное обеспечение для автоматизированного сбора информации и управления КГУ можно успешно использовать и для других подобных установок. Около 30% созданного программного обеспечения составляют программы системного и библиотечного типа, которые можно успешно применить в любых пользовательских программах, где требуются арифметические расчеты, представление данных на цветном телевизионном мониторе, калибровка преобразователей и т.п. Модель системы управления источником тока сверхпроводящих магнитов позволила проверить источник в рабочих условиях, измерить его основные параметры, на основании чего были выработаны рекомендации по его усовершенствованию. Разработанный блок часов реального времени применяется и в ряде других автоматизированных систем.

Реализация результатов работы. На основе анализа требований к автоматизированной системе и в результате практической работы автора созданы: система для испытательного стенда трехпрототипных периодов сверхпроводящего синхротрона и модель системы управления источником питания сверхпроводящей магнитной системы. Разработанное программное обеспечение для ожигательной криогенной установки использовано при ее запуске и эксплуатации. Часть разработанной аппаратуры и программ библиотечного типа используется и в других системах в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на II симпозиуме по применению микро-ЭЭМ и микропроцессоров (Будапешт, 1981 г.), на X и XI Международных симпозиумах по ядерной электронике (Дрезден, 1980 г., Братислава, 1983 г.) и опубликованы в препринтах и сообщениях ОИЯИ.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 124 страницы машинописного текста, в том числе 36 рисунков, 32 таблицы, 3 приложения и библиографический список литературы из 72 наименований.

Автор защищает:

1) Программное обеспечение для автоматизированной системы измерения и управления ожигателем большой производительности типа КГУ 1600/4,5, с помощью которого полностью решен вопрос автоматического сбора и представления данных в удобной форме оператору в процессе измерений и управления установкой.

2) Автоматизированную измерительную систему для проверки статических параметров на стенде трех периодов модельного сверхпроводящего синхротрона на основе микро-ЭЭМ.

3) Модель системы управления источником тока для сверхпроводящей магнитной системы, на основании которой проверен алгоритм работы и измерены некоторые основные параметры источника.

4) Методику автоматизации температурных измерений в диапазоне 4,2 – 300 К с относительной точностью 1% с применением микропроцессорной системы.

5) Методику работы в реальном времени микро-ЭЭМ на основе использования универсального времязадающего модуля.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность создания автоматизированных систем сверхпроводящих ускорителей для задач измерения и управления. Сформулирована цель работы, отмечена ее новизна и практическая ценность, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе "Задачи сбора информации и управления в современных ускорительных комплексах" рассмотрена структура автоматизированных систем ряда крупных ускорителей. Сформулированы основные требования к автоматизированной системе и с точки зрения этих требований рассмотрены отличия, которые вносит в систему использование сверхпроводящей магнитной системы.

Ускорительный комплекс состоит из нескольких подсистем: инъекции пучка, питания магнитных элементов, ускорения пучка, вакуумной подсистемы, подсистемы диагностики, вывода пучка и автоматизированной системы. Автоматизированную систему ускорителя характеризуют следующие параметры: сложность, модульность, протяженность, надежность и эффективность связи оператора с объектом. Сложность определяется, в свою очередь, такими характеристиками, как величина потока информации $I(t)$, число измерительных и управляющих каналов M_m, M_c , коли-

чество задач измерения и управления A_m, A_c , средняя длина измерительной и управляющей программы P_m, P_c .

Ускорители, использующие явление сверхпроводимости, отличаются от ускорителей классических в технологических, конструктивных и количественных параметрах. Автоматизированная система ускорительного комплекса со сверхпроводящими магнитами должна выполнять две задачи. Во-первых, она должна обеспечить пучок с заданными параметрами для физических экспериментов, как и в классических ускорителях. Во-вторых, она должна помочь исследовать комплексное поведение всех подсистем в различных режимах с целью более эффективного исследования ускорителя, поскольку отсутствует опыт работы с такими установками. Новым элементом ускорителей со сверхпроводящими магнитами является система криогенного обеспечения. Криогенная система представляет собой относительно сложный технологический комплекс. Она работает в разных режимах, в том числе в режиме охлаждения при выключенной сверхпроводящей магнитной системе. Из этих соображений ее разрабатывают как автономную подсистему, включая ее автоматизированную систему.

Конструктивные особенности, обусловленные расположением сверхпроводящих магнитных обмоток в криостате, влияют на конфигурацию системы передачи данных и систему приемников и передатчиков информации. Эти факторы нужно учитывать при выборе структуры системы с целью минимизации потоков информации в автоматизированной системе.

Во второй главе исходя из основных характеристик и параметров модельного сверхпроводящего синхротрона (Шелаев И.А. и др. Проектные параметры модельного сверхпроводящего синхротрона ОИЯИ. Дубна, 1983, ОИЯИ: Р9-83-582), проведен подробный анализ датчиков системы и исполнительных устройств создаваемого в ЛВЭ ОИЯИ ускорителя. Автоматизированная система измерений и управления ускорителя должна обслуживать ≈ 400 измерительных каналов M_m и ≈ 50 исполнительных звеньев управления - M_c . Выполненный анализ каналов измерения и управления согласно выполняемым функциям позволил выделить следующие 7 основных задач измерения - A_m / I /:

- 1) измерение амплитуды высоковольтного импульса;
- 2) определение формы импульса тока (источника ионов, элементов магнитной системы синхротрона, корректоров);
- 3) измерение постоянных напряжений;
- 4) диагностика пучка (положение по вертикали, горизонтали, интенсивность);
- 5) временные измерения (интервалы времени, частота);
- 6) измерение технологических параметров (температура, вакуум, уровни

жидкого гелия и азота, подсистема криогенного обеспечения);

- 7) регистрация места перехода из сверхпроводящей в нормальную фазу.

Были также сформулированы 5 основных задач управления - A_c , задающих:

- 1) аналоговые сигналы, изменяющиеся во времени;
- 2) постоянные напряжения;
- 3) управляющий код;
- 4) временной интервал;
- 5) управляющие сигналы для подсистемы криогенного обеспечения.

Потоки информации для отдельных задач были рассчитаны по формуле

$$I_j(t) = \sum_{i=1}^N I_{ij} [h_{t_{0i}}(t) - h_{t_{1i}}(t)], \quad (I)$$

где N - число интервалов измерений $T_i = (t_{0i}, t_{1i})$; $i = \overline{1, N}$; $I_{ij} = f_{ij} L_j$ - величина потока информации j -ой задачи на интервале T_i ; f_{ij} - частота опроса; L_j - длина кода сообщения от j -ой задачи; $h_{t_k}(t)$ - единичная функция. Результаты расчета для всех перечисленных задач измерения и управления приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

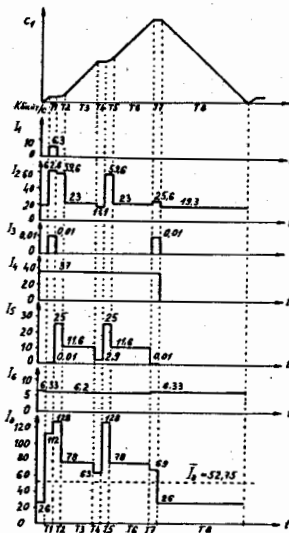


Рис.1. Потоки информации задач измерения.



Рис.2. Потоки информации задач управления.

Выбросы величины потока информации наблюдаются в интервалах времени T_2 и T_5 . Они равны $I_{\max} = 180$ кбайт/с при среднем потоке в системе $\bar{I} = 75$ кбайт/с. Потоки информации рассчитаны для минимальной длительности цикла ускорителя $T = 7,39$ с, которая, в свою очередь, задается используемыми источниками тока магнитной системы.

С учетом конструктивных особенностей модельного сверхпроводящего синхротрона была выбрана структура автоматизированной системы с разбиением по функциональному признаку на подсистемы, решающие однотипные задачи. На основании расчета потоков информации и параметров доступных ЭВМ (пропускная способность по программному каналу равна 100 кбайт/с) при разработке структурной схемы вышеперечисленные задачи сгруппированы в четыре подсистемы, приведенные в таблице. Исключением является криогенная система, которая не связана с циклом ускорителя и составляет полностью изолированную автономную подсистему. Структурная схема автоматизированной системы показана на рис. 3^{1/}.

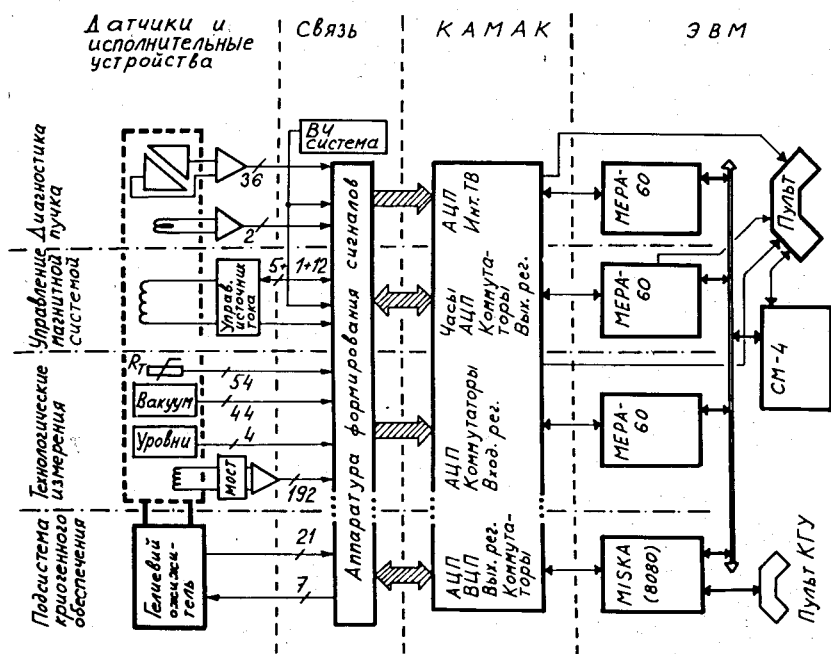


Рис. 3. Структурная схема автоматизированной системы модельного сверхпроводящего синхротрона.

Таблица. Характеристики системы измерения и управления

№ пп	Тип задачи	Поток информации $I(t)$, кбайт/с		Длительность интервала приема T_{\max} , мс	Количество каналов $M_m + M_c$
		\bar{I}	I_{\max}		
1.	Измерение и управление магнитной системой (диполи, квадруполь, корректоры).	42,7	119	20	41
2.	Диагностика пучка и однократные измерения и управление в цикле ускорителя.	25,1	80,3	40	274
3.	Технологические измерения (температура, вакуум, уровни жидкого азота, гелия).	0,01	0,13	-	102
4.	Обслуживание криогенной системы.	6,3	6,3	-	38
Пределные величины		74,11	119	20	455

Таким образом, из анализа структурной схемы следует, что в первую очередь необходимо провести моделирование автоматизированной системы для испытаний магнитной системы, конструкции криостата и ионпровода в рабочих условиях. С испытательными работами на стенде и в дальнейшем с эксплуатацией ускорителя был также связан запуск мощного гелиевого ожигателя и модели системы управления источниками питания магнитной системы. Решение этих задач изложено в последующих трех главах диссертации.

Для проверочных испытаний были собраны три из 24 регулярных периодов ускорителя (Шелаев И.А. и др. Три прототипных периода СП магнитной системы. ОИЯИ, Р9-82-383, Дубна, 1982). Автоматизированный стенд для их комплексной проверки описан в третьей главе. Он выполняет следующие задачи^{2/}: проверку отдельных систем магнитной оптики (отклоняющих диполей, фокусирующих и дефокусирующих линз), измерение формы тока, температуры, вакуума и слежение за образованием нормальной фазы в элементах магнитной системы. Структурная схема автоматизированной системы стенда показана на рис. 4.

Для стенда были разработаны часы реального времени с четырьмя режимами измерения или задания (одиночного или повторного) интервала времени^{3/}. Также был разработан соответствующий интерфейс для организации каналов измерения аналоговых величин^{4/}. Была разработана методика автоматизированных измерений в широком диапазоне температур от сверхнизких - 4,2К до 450К с точностью $\approx 1\%$ в области крио-

генных температур, и $\approx 5\%$ в области 300 К и выше^{/5/}. Для измерения температуры использованы терморезисторы типа ТВО, калибровочная зависимость для которых описывается степенным рядом. Для поиска коэффициентов ряда использован метод наименьших квадратов с условием минимизации суммы квадратов относительных отклонений

$$Q_{\text{отн}} = \sum_{i=1}^p \left[\frac{T_{0i} - T_i}{T_{0i}} \right]^2 \rightarrow \text{МИН}, \quad (2)$$

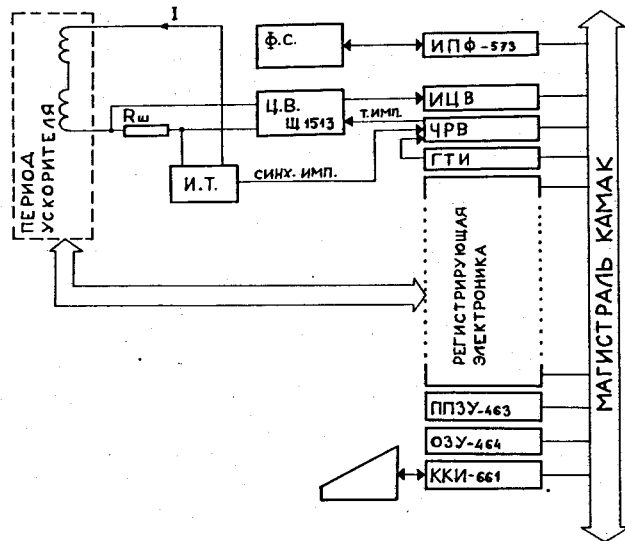


Рис. 4. Структурная схема системы для проверки прототипных периодов. Обозначение: ИПФ - интерфейс перфоратора и фотосчитывателя, ИЦВ - интерфейс цифрового вольтметра, ЧРВ - часы реального времени, ГТИ - генератор тактовых импульсов, ККИ - интеллигентный контроллер крейта, И.Т. - источник тока, Ф.С. - фотосчитыватель, Ц.В. - цифровой вольтметр.

калибровочной зависимости степенным рядом выгодно и с точки зрения обработки результатов измерения, потому что для вычислений используются только простейшие арифметические операции (сложение, вычитание, умножение, деление), что позволяет обрабатывать результаты в реальном времени.

где T_{0i} - температура калибровочной точки, измеренная с помощью образцового термометра с точностью 0,5%. Температура T_i определялась с помощью степенного ряда. При использовании для минимизации суммы квадратов относительных отклонений вместо обычно применяемой суммы квадратов абсолютных отклонений было получено удовлетворительное описание калибровочной зависимости полиномом с $n = 5$ коэффициентами при относительной точности 1% в целом диапазоне. Описание

Следующим элементом автоматизированной системы сверхпроводящего ускорителя является система диагностики и управления гелиевым ожижителем, которая описана в четвертой главе. Для управления криогенной гелиевой установкой типа КТУ 1600/4,5 была разработана микропроцессорная автономная система^{/6/}. Программное обеспечение для этой системы написано на ассемблере микропроцессора Intel 8080 и занимает 28,5 кбайт. В программное обеспечение входят программы системного, библиотечного типа: арифметические подпрограммы, обслуживание интерфейса цветного телевизора, линейная регрессия, тест памяти общего объема 10,5 кбайт и программы пользователя, специально написанные для установки: сбор данных, обработка данных и вычисление результатов, представление результатов, диалог, управление установкой объемом 18,5 кбайт^{/7/}. Структура организации программного обеспечения установки представлена на рис. 5.

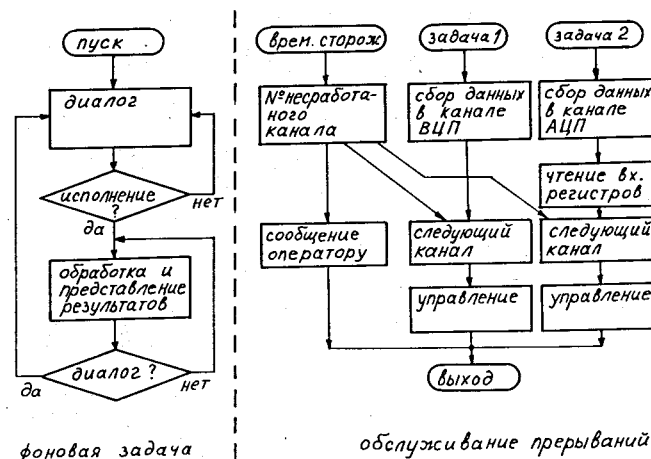


Рис. 5. Структурная схема программного обеспечения системы ожижителя.

Функционально программы пользователя можно разделить на две основных группы: программы фоновой задачи и программы обслуживания прерываний. К программам фоновой задачи относится обработка и вычисление результатов, их представление оператору и программа диалога. В этих программах сосредоточены все вычисления, связанные с обработкой результатов при использовании набора арифметических подпрограмм с плавающей запятой. Полное обслуживание одного измерения в среднем составляет ≈ 50 мс. В программы обслуживания прерываний входят: программа сбора данных и программа управления установкой. В этих

программах для предварительной обработки данных используются только операции, основанные на исполнении машинных команд микро-ЭВМ (типа ADD, COMP, MOVE и т.д.) с целью достижения максимального быстродействия. Обслуживание одного прерывания в среднем составляет ≈ 3 мс. Указанные временные параметры программ полностью обеспечивают их применение в реальном времени. Программа сбора данных содержит подпрограмму обновления буфера данных, которая готовит для программ обработки в качестве входных данных результаты последнего измерения. Такая организация обеспечивает сбор данных и управление в каждом цикле измерения независимо от вида фоновой задачи.

Последняя задача, которая была решена в работе, связана с управлением источниками питания ускорителя. Она описана в пятой главе. Для питания сверхпроводящей магнитной системы предусматриваются шестифазные тиристорные источники тока.

Система питания сверхпроводящих магнитов является одной из важных систем ускорителя и потому для проверки ее работоспособности и измерения основных параметров, к которым относится величина пульсаций на нижнем (инжекция) и верхнем (вывод) плато, стабильность повторения величины тока на плато, была создана модель системы ее управления^{8/}. Структурная схема системы представлена на рис. 6.

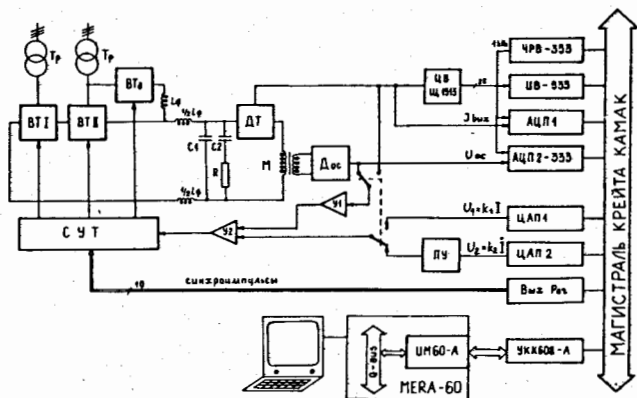


Рис. 6. Структурная схема модели управления источником тока. Обозначения: Тр - трансформатор, ВТ - тиристорные мосты, ДТ - датчик тока, Дос - датчик обратной связи, СУТ - система управления тиристорами, У1 - усилитель, У2 - сравнивающее устройство, ЧРВ - часы реального времени, ИВ - интерфейс вольтметра, Вых.Рег. - выходной регистр, УКК - универсальный крест-контроллер.

Система выполнена таким образом, что позволяет управлять источником или по выходному току или по его производной \dot{I} в зависимости от используемого датчика на выходе. Система позволяет генерировать ток сложной формы в нагрузке (треугольный импульс с двумя плато и плавными переходами), при одновременном измерении выходных величин. Оператор общается с системой набором команд, с помощью которых можно задавать начальные параметры, изменять режим измерений и выводить результаты. В системе используется микро-ЭВМ МЭРА-60 с универсальным контроллером креста. С помощью установки были определены следующие параметры: подавление пульсаций на верхнем и нижнем плато, которое составляет 87 и 70 дБ соответственно и стабильность повторения тока на плато, которая находится в пределах $\pm 0,1\%$.

В заключении сформулированы основные выводы выполненной работы:

1) Выполнен анализ структуры автоматизированных систем сверхпроводящих ускорительных комплексов. Отмечены отличия, которые вносят использование криогенной техники в основные требования к параметрам автоматизированных систем.

2) Выполнена классификация задач измерения и управления модельного сверхпроводящего синхротрона, который создается в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, рассчитаны потоки информации автоматизированной системы и предложена структурная схема автоматизированной системы.

3) Разработана и применена методика температурных измерений в диапазоне температур 4,2 - 300 К с относительной точностью $\approx 1\%$ и создана автоматизированная система измерений с микропроцессором.

4) Создана автоматизированная система для проверки статических параметров трех периодов модельного сверхпроводящего синхротрона. Выполненные стендовые измерения позволили определить конструкцию криостата синхротрона.

5) Разработано математическое обеспечение для автоматизированной системы измерения и управления ожигателем большой производительности. Решен вопрос автоматического сбора данных и предоставления их в удобной форме оператору в процессе измерений и управления установкой. В разработанное программное обеспечение входят программы библиотечного, системного типа и прикладные программы. Общий объем программного обеспечения, которое написано на ассемблере, составляет 28,5 кбайт.

6) Создана модель системы управления источником питания сверхпроводящей магнитной системы с использованием микропроцессоров. На основе этой системы были проверены алгоритмы работы источников и измерены их основные параметры.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ефимов Л.Г.,..., Турзо И. и др. Автоматизированная система в проекте модельного сверхпроводящего синхротрона. ОИЯИ, IO-83-592, Дубна, 1983.
2. Турзо И., Шелаев И.А. Стенд для испытания сверхпроводящих магнитов с микропроцессорным управлением. - В кн.: Труды X Международного симпозиума по ядерной электронике, Дрезден, ГДР, 1980, т.1, с. 62-65.
3. Ан Сен Гук, Турзо И. Программированные часы реального времени в стандарте КАМАК. ОИЯИ, IO-81-170, Дубна, 1981.
4. Сайфулин Ш.З., Турзо И. Интерфейс ИВ-533 для цифрового вольтметра ШП513 в стандарте КАМАК. ОИЯИ, IO-81-138, Дубна, 1981.
5. Дацков В.И., Турзо И., Шелаев И.А., Юдин И.П. Измерение температур в диапазоне $4,2 + 450$ К с помощью микропроцессорной системы в стандарте КАМАК. - В кн.: Труды 2-го симпозиума по применению микро-ЭВМ и микропроцессоров, Будапешт, 6-9 окт. 1981, т.1, с. 225-233.
6. Агапов Н.Н.,..., Турзо И. и др. Микропроцессорная система управления большим гелиевым ожижителем. ОИЯИ, P10-82-368, Дубна, 1982.
7. Агапов Н.Н., Базылева Н.П., Слепнев В.М., Турзо И. Матобеспечение для системы управления большим гелиевым ожижителем. ОИЯИ, IO-83-357, Дубна, 1983.
8. Дмитриева Е.А.,..., Турзо И. Модель системы управления и контроля источника питания сверхпроводящих магнитов. - В кн.: Тез. докл. XI Международного симпозиума по ядерной электронике, Братислава, 6-12 сент. 1983, с. IOI.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 февраля 1984 года.