



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2003-6
На правах рукописи

Алферов Владимир Николаевич

**СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА
УНИФИЦИРОВАННЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ
И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ НА КАНАЛАХ ЧАСТИЦ
И СТЕНДАХ ИФВЭ**

01.04.20 – физика пучков частиц и ускорительная техника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Протвино 2003

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор В.Н. Болотов (ИЯИ, г. Троицк), член-корреспондент АН РФ, профессор С.П. Денисов (ИФВЭ, г. Протвино), доктор технических наук, профессор В.М. Рыбин (МИФИ, г. Москва).

Ведущая организация – Лаборатория высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна).

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2003 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д034.02.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142291, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Диссертация разослана «__» _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д034.02.01

Ю.Г. Рябов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Последние несколько десятилетий фундаментальная наука и, в первую очередь, физика высоких энергий, требует все более сложных и дорогих приборов – ускорителей и экспериментальных установок для проведения исследований на них. В свою очередь, создание ускорителей на высокие и сверхвысокие энергии включает в себя разработку аппаратуры с предельными параметрами по точности, диапазону, надежности, а также исследования этой аппаратуры на специальных стендах. Эти исследования невозможны без комплексной автоматизации процессов измерения и управления.

Широкий функциональный состав аппаратуры (магнитная, вакуумная, криогенная, механическая), большой динамический диапазон и высокие требования к точности измерения и управления, а также распределенность управляемого оборудования на значительной площади требуют системного подхода к выбору структуры и созданию аппаратно–программных средств измерения и управления и определяют актуальность задачи разработки комплекса унифицированных средств для построения систем управления электрофизическими установками и стендами ИФВЭ.

Цель диссертационной работы – разработка комплекса унифицированных программно-аппаратных средств измерения и управления электрофизическим оборудованием и его применение для каналов выведенных из ускорителя частиц и стендов исследования и испытания электрофизической аппаратуры в ИФВЭ, повышение ее технических характеристик.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложен, создан и внедрен унифицированный набор программно-аппаратных средств для систем управления различными группами электрофизического оборудования на установках и стендах ИФВЭ.

1. Впервые в отечественной физике высоких энергий автоматизирована сложная система каналов выведенных из ускорителя пучков частиц.
2. Созданы системы управления стендами исследования и испытания мишеней с большим удельным энерговыделением и стендов исследования «теплых» и сверхпроводящих магнитов ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ.
3. Впервые в стране автоматизирован криогенный комплекс для получения жидкого азота и гелия.
4. Разработан ряд систем для первого в отечественной физике высоких энергий высокочастотного сепаратора для выделения чистых пучков частиц на жидководородную пузырьковую камеру (ЖВПК) «Людмила».
5. Разработан набор магистрально-модульной аппаратуры для построения систем управления электрофизическим и технологическим оборудованием.

Практическая ценность работы заключается прежде всего в том, что реализация ее обеспечила высококачественное и своевременное выполнение научной программы Института физики высоких энергий как в области экспериментов на ускорителе У-70, так и при разработке оборудования ускорительно-накопительного комплекса УНК.

Разработаны единые решения для различного класса задач:

- научных, таких как управление каналом частиц или исследование характеристик сверхпроводящих магнитов;
- технических задач для научных применений, таких как автоматизация производства жидкого гелия;
- промышленных задач на базе разработок для электрофизического оборудования.

Ряд найденных в процессе работы научно-технических решений был использован в практике создания и эксплуатации линейных ускорителей, других импульсных систем и для разработки криогенного оборудования. К ним относятся:

- стабилизация напряжения импульсного модулятора;
- исследование и улучшение характеристик импульсных трансформаторов;
- исследование и улучшение характеристик мощных клистронов;
- методика ввода в нагрузку большой высокочастотной мощности и удобное измерение ее;
- система управления стендом испытания криогенного оборудования.

Автор защищает:

1. Проанализированные требования к системам управления электрофизическим оборудованием ускорительных и технологических установок, методы и средства измерения, допустимые погрешности и динамический диапазон измеряемых величин. Структуру и вопросы организации вычислительных средств для систем управления, коммуникационного оборудования и протоколов обмена, а также требования к интерфейсной аппаратуре для сопряжения с объектами измерения и управления.
2. Разработанный и внедренный в составе систем управления электрофизических установок и стендов ИФВЭ набор унифицированной аппаратуры для:
 - магнитных измерений и управления источниками питания магнитных систем;
 - вакуумных измерений и управления вакуумным оборудованием;
 - исследования мишеней с высоким удельным энерговыделением;
 - измерения и управления параметрами криогенного оборудования;
 - исследования характеристик сверхпроводящих магнитов.
3. Разработанную, созданную и внедренную в многолетнюю эксплуатацию систему управления комплексом каналов выведенных из ускорителя У-70 частиц для экспериментальных установок «Мирабель», «Людмила», ФОДС, СВД, КМН.
4. Разработанные новые и улучшенные характеристики существующего оборудования высокочастотного сепаратора, обеспечившие повышение чистоты пучка антипротонов.
5. Разработанные и внедренные в эксплуатацию системы управления стендами магнитных измерений, исследования мишеней, исследования свойств сверхпроводящих магнитов, криогенного оборудования, обеспечившие наряду с другими мерами разработку магнитов УНК.
6. Разработанную систему управления криогенным комплексом, осуществленный автоматический режим работы при получении жидкого гелия.
7. Разработанный и использованный в промышленности набор магистрально-модульной аппаратуры для построения систем управления электрофизическим и энергетическим оборудованием.

Апробация диссертации

Основные результаты опубликованы в виде статей в журналах: «ЖТФ», «Приборы и техника эксперимента», «Электронная техника», «Электронные приборы», «Вопросы атомной науки и техники», препринтов ИФВЭ, FNAL (США), в сборниках трудов конференций: 8-th International Conference on High Energy Accelerators, CERN, 1971; International Conference on Accelerator and Large

Experimental Physics Control Systems (Tsukuba, 1991, Chicago, 1995, Beijing, 1997, Trieste, 1999); 7-го Всесоюзного, 15-, 17-го Российских совещаний по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1982, Протвино, 1996, 2000); 3- и 4-го Всесоюзных семинаров по автоматизации научных исследований в ядерной физике и смежных областях; Всесоюзных и Российских совещаниях по ускорителям заряженных частиц.

Материалы, вошедшие в диссертацию, свыше 10 лет использовались автором в учебном процессе со студентами кафедр №№ 2 и 14 МИФИ.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 215 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержит 30 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 211 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются экспериментальные физические исследования в ИФВЭ и обосновывается необходимость разработки систем управления каналами частиц и исследовательскими стендами.

Основными направлениями физических исследований на ускорительном комплексе У-70 ИФВЭ являются мезонная спектроскопия, поиск экзотических состояний частиц (многокварковые мезоны и барионы, глоболы и др.), поляризационные исследования, наблюдения редких распадов каонов, а также исследования взаимодействий нейтрино. Источником частиц для экспериментов является протонный синхротрон У-70, который обеспечивает интенсивность до 5×10^{13} протонов за цикл при полной длительности цикла ускорения 8 с. Внутренние мишени ускорителя позволяют формировать вторичные пучки различной интенсивности с моментом от 10 до 70 ГэВ/с.

Ускорительный комплекс включает в себя линейный ускоритель ЛУ-30 на энергию 30 МэВ, кольцевой бустер на энергию 1,5 ГэВ, протонный синхротрон на энергию 70 ГэВ с системами быстрого и медленного выводов, а также систему транспортировки выведенных из ускорителя частиц.

Кратко рассмотрим несколько больших экспериментальных установок, которые были созданы в ИФВЭ.

В 70-е годы крупнейшими были пузырьковые камеры «Мирабель», СКАТ и «Людмила». Они облучались сепарированными пучками частиц малой интенсивности и высокой чистоты. Начиная с середины 80-х годов, создаются новые установки для работы на выведенных из ускорителя пучках. Крупнейшая из них – Комплекс Меченых Нейтрино (КМН). Пучок протонов из У-70 отклоняется тремя магнитами на канал № 23 меченых нейтрино.

Независимая программа исследований осцилляций нейтрино проводится на установке ИФВЭ – ОИЯИ Нейтринный Детектор (НД). Выведенный из У-70

пучок протонов транспортируется в канале №8 и фокусируется на мишень–поглотитель. Центральной частью НД является калориметр, предназначенный для работы в пучках нейтрино с энергией от 2 до 30 ГэВ.

Широкая программа исследований в барионных реакциях реализована на установке СФИНКС–М, расположенной на канале № 21. В настоящее время канал перестраивается под новые эксперименты с К-мезонами с использованием сверхпроводящего высокочастотного сепаратора.

Создание новых и модернизация действующих установок потребовали развития и системы каналов транспортировки частиц для них. Существенным также является то, что во многих случаях часть аппаратуры канала входит в состав той или иной установки. Рост объема магнитооптического оборудования вместе с его усложнением, а также значительная протяженность каналов потребовали нового комплексного подхода к созданию системы управления ими.

Проект ускорительно-накопительного комплекса УНК предусматривал создание в 21-км тоннеле первой ступени ускорителя на 600 ГэВ на базе теплых магнитов, а также второй ступени на энергию 3 ТэВ на базе сверхпроводящих (СП) магнитов. Разработка в ИФВЭ теплых и СП-магнитов и другого оборудования предопределила создание в ИФВЭ и НПО «Криогенмаш» значительного числа (более 10) исследовательских и испытательных стендов.

В первой главе рассматриваются параметры и характеристики оборудования каналов частиц и исследовательских стендов, формулируются требования к системам управления электрофизическим оборудованием.

Описанные в диссертации средства измерения и управления предназначались для следующих объектов:

- комплекс каналов транспортировки частиц, выведенных из ускорителя У-70,
- шесть стендов исследования и испытания магнитов, линз, вакуумного оборудования и мишеней УНК,
- криогенное оборудование для обеспечения пяти стендов исследования и испытания СП-магнитов и создания криогенного комплекса УНК,
- высокочастотный сепаратор для ЖВПК «Людмила».

Целью разработок было создание набора тиражируемых унифицированных модульных средств для построения различных систем управления электрофизическим оборудованием каналов частиц и стендов ИФВЭ.

Основные параметры и характеристики исследуемого и управляемого электрофизического оборудования

К основным исследуемым приборам и системам относятся:

- магнитные диполи, квадруполь и корректоры, теплые и сверхпроводящие;
- коллиматоры пучка частиц;

- высокочастотные сепараторы частиц;
- мишени, подвергающиеся облучению высокоинтенсивным пучком;
- каналы транспортировки частиц;
- стенды исследования и испытания магнитов, линз и мишеней;
- криогенное и вакуумное оборудование.

К числу параметров, измеряемых при исследовании магнитных диполей, относятся: величина магнитного поля, отклоняющая сила магнита, краевые поля, линейность зависимости поля от тока, пространственные гармоники поля, электрическая постоянная времени, накопленная энергия, положение медианной плоскости относительно реперных знаков. В СП-магните, кроме того, исследуются механические напряжения между слоями обмотки, температура сверхпроводника, динамические потери, регистрируется и изучается квенч-переход, т.е. срыв сверхпроводимости, и появление нормальной фазы. При квенч-переходе с целью предохранения от разрушения магнит отключается от источника тока, шунтируется, и из него эвакуируется запасенная энергия.

В магнитном квадруполе важной характеристикой также является положение магнитной оси и главных плоскостей и привязка их к геодезическим реперам.

Коллиматоры пучка предназначены для ограничения поперечных размеров пучка и выделения импульсного интервала при магнитном анализе пучка. Щеки коллиматора снабжаются отдельными приводами с системами измерения положения объекта управления.

Высокочастотные сепараторы применяются на ускорителях средних энергий (десятки ГэВ) для получения чистых пучков частиц. Сепаратор, описываемый в настоящей диссертации в основном применялся для получения чистого пучка антипротонов с импульсом 23 ГэВ/с.

В диссертацию включены работы автора, связанные со стабилизацией напряжения импульсного модулятора, вводом в дефлектор и измерением высокочастотной мощности в импульсе. Эти работы обеспечивали минимизацию мюонного и π -мезонного фона в пучке антипротонов.

Необходимость точных знаний о процессах в сверхпроводящем магните, чувствительность его к качеству криопродукта, длительность захолаживания и отогрева СП-магнита, высокая стоимость простоя ускорителя с СП-магнитами обусловили необходимость автоматизации криогенного комплекса, обеспечивающего СП-магнит жидким гелием и жидким азотом.

При испытании источников вторичных частиц – мишеней, облучаемых интенсивным протонным пучком малых поперечных размеров, изучался радиационный разогрев мишени, внутренние напряжения в ней, интенсивность и фокусировка протонного пучка, положение его относительно мишени.

Для описания режимов перечисленного оборудования потребовалось точное измерение десятков разнообразных физических параметров, а для управления этим оборудованием формирование различных управляющих воздействий.

Анализ требований к средствам управления электрофизическим оборудованием

Пользователями системы управления являются:

- физики-исследователи;
- дежурный персонал;
- инженерный персонал, ответственный за оборудование.

Требования к системе управления со стороны этих групп не одинаковы. Чтобы удовлетворить всем требованиям, система управления должна обеспечивать:

- сбор и обработку данных о режимах работы оборудования;
- выполнение функций непосредственного управления оборудованием и поддержания режимов;
- оперативную корректировку алгоритмов управления;
- выдачу аварийных сигналов о выходе параметров за допустимые пределы;
- вычисление обобщенных параметров и представление их в удобном для различных пользователей виде;
- обмен информацией с другими пользователями;
- документирование и ведение архива.

Как правило, в состав аппаратуры современных СУ входят средства сопряжения с объектом измерения и управления или интерфейсная аппаратура, вычислительные средства, а также коммуникационные средства.

Интерфейсная аппаратура в составе СУ является наиболее консервативной ее частью со сроком жизни 10-15 лет, а иногда и более. Функционально она включает в себя датчики физических величин, электронику управления исполнительными механизмами, аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), регистры ввода-вывода и др.

Вычислительные средства составляют покупные ЭВМ с устройствами ввода/вывода, отображения информации и системного программного обеспечения (ПО). Эти средства чаще меняются, средний срок жизни их можно оценить в 5-7 лет.

Прикладное ПО чаще всего подвергается изменениям, однако, будучи написанным на универсальных языках (Фортран, С), легко переносится при замене самой ЭВМ или ее системного ПО и может таким образом «пережить» среду своего функционирования.

Опыт автоматизации зарубежных ускорителей показал, что при создании системы управления ускорителя на единицы-десятки ГэВ суммарные трудозатраты разработчиков ПО составляют 500-1000 человеко-лет, сходной величиной характеризуются и затраты на разработку интерфейсной электроники. Названные выше система каналов и исследовательские стенды, как объект автоматизации в сумме сопоставимы со средних размеров ускорителем. Отсюда видна важность правильного выбора стратегии автоматизации.

Оптимальным решением широкого круга задач по исследованию и управлению группами электрофизического оборудования в различных сочетаниях с частично совпадающими требованиями, притом требующих зачастую одновременного решения, было бы создание унифицированного комплекта средств управления с набором электроники, вычислительной техники и программного обеспечения, тиражируемого на разных объектах и дополняемого лишь компонентами, отражающими специфику объекта.

Выводы

Создание системы каналов выведенных из ускорителя У-70 частиц и начало работ по созданию ускорительно-накопительного комплекса УНК в ИФВЭ потребовали в начале 80-х годов решения задач комплексной автоматизации действующих и вновь создаваемых электрофизических установок и стендов. Широкий спектр оборудования, широкий динамический диапазон измеряемых и управляемых величин потребовали унификации при создании измерительных и управляющих средств.

Во второй главе делаются выбор и разработка системных средств измерения и управления.

Унифицированная аппаратура сопряжения оборудования с ЭВМ

Аппаратура сопряжения в системах управления электрофизическим оборудованием предназначена для сбора сигналов с датчиков технологических параметров, преобразования их в цифровую форму с нужной дискретностью и частотой, промежуточного хранения, ввода в ЭВМ, преобразования машинных команд в «понятную» для оборудования форму, распределения этих команд по необходимым адресам.

На первой из примененных для целей автоматизации ЭВМ М-6000 имелось встроенное устройство связи с объектом (УСО), к которому присоединялись датчики электрических сигналов [1, 2]. К началу 80-х годов в экспериментальной физике уже был широко распространен электронный стандарт КАМАК в качестве интерфейса между ЭВМ и детекторами экспериментальных установок. В ИФВЭ был разработан набор «Вектор»-СУММА – отраслевой аналог КАМАК. Он и был принят за основу интерфейсной электроники систем управления. Однако модули СУММА не могли решить все задачи интерфейса: мощные модули вносили бы слишком большие помехи в работу каркаса, поэтому в состав интерфейсной электроники входили и другие конструктивы и блоки.

По мере усложнения систем управления выяснились следующие недостатки и ограничения системы СУММА как интерфейса: низкая тактовая частота магистрали, синхронный протокол, затрудняющий использование модулей различного быстродействия, однопроцессорный характер магистрали в базовом документе и др. Эти недостатки, терпимые или преодолимые в небольших системах, становились критическими при разработке системы управления УНК, где количест-

во каналов измерения составляет сотни тысяч, а протяженность магистралей — километры.

Был проведен анализ перспективных разработок интерфейсных стандартов в качестве кандидата для СУ УНК. Сравнивались такие стандарты, как FASTBUS, КОМПЕХ, MULTIBUS 1 и MULTIBUS 2, P896, E3S, VME. Выбор был сделан в пользу MULTIBUS 1 и его отечественной версии И41. Этот выбор предопределили такие свойства стандарта, как многопроцессорность, повышенная по сравнению с КАМАК тактовая частота магистрали (5 МГц), асинхронный характер передачи данных, большое адресное поле и поле данных, относительно низкая стоимость. Механический конструктив стандарта Евромеханика был дешев и выпускался промышленностью.

Для СУ второй (сверхпроводящей) ступени УНК был разработан такой каркас и изготовлена опытная партия каркасов. В дальнейшем эта разработка легла в основу набора для построения систем управления электрофизическим и промышленным оборудованием, разработанных в 1995 году [3, 26].

Появление на рынке персональных ЭВМ позволило создавать небольшие системы на основе вставных плат ввода/вывода без применения отдельных каркасов интерфейсной электроники. Так организована система мониторинга отказов системы питания кольцевого электромагнита У-70 [4].

Унифицированные вычислительные средства и программное обеспечение для построения систем управления электрофизическим оборудованием каналов и стендов ИФВЭ

Анализ требований к системе управления показывает, что задачи для вычислительной техники (ВТ), как правило, подразделяются на два вида: простые рутинные, например вычисление температуры по величине сопротивления, и задачи более высокого уровня, такие как вычисление и представление обобщенных параметров или принятие сложных решений по управлению. ЭВМ с производительностью 100-150 тыс. операций в секунду, с развитой системой прерываний, адресным пространством 64 кбайт, интерфейсом с двумя асинхронными линиями связи вполне соответствовала задачам первого вида. Задачи второго вида следовало решать с помощью более мощных средств, освободив их от решения рутинных задач. Такой подход предопределил создание двухуровневых систем управления.

В 80-е годы в распоряжении разработчиков были устаревшие к тому времени мини-ЭВМ М-6000, ЭВМ Единой серии, в частности, применявшаяся для целей управления ЕС-1010, а также мини- и микроЭВМ серии СМ. Предпочтение определенно было отдано отечественной серии СМ, так как и М-6000, и ЕС-1010 имели неудобную для целей организации управления систему ввода-вывода и столь же неудобную операционную систему. Кроме того, серия СМ включала в себя программно-совместимые ЭВМ разной мощности и цены, что позволяло выбирать минимально необходимый вариант набора вычислительных средств.

Для решения простых задач применялись микроЭВМ Э-60 или интеллектуальные контроллеры на базе микропроцессорного набора К1801, задачи более высокого уровня решались с помощью программно-совместимых с Э-60 и между собой мини-ЭВМ СМ-4, СМ-1420, «Электроника 100/25».

Альтернативным вариантом набору К1801 могли бы служить микропроцессорные серии К580 и/или К1810, однако из-за отсутствия готовых микроЭВМ на базе этой серии, а также из-за программной несовместимости ее с СМ ЭВМ они применялись гораздо реже.

Для представления данных оператору в табличной форме применялся штатный монитор ЭВМ. Для представления графической информации, в частности мнемосхем, в 80-е годы применялся бытовой телевизионный приемник, управляемый специальным контроллером – модулем СУММА.

В качестве операционной системы (ОС) ЭВМ СМ использовалась ОС RSX-11M. Один из основных ее недостатков – большое время реакции на внешние прерывания – компенсировался наличием микроЭВМ, реализующих большинство программ реального времени. В качестве ОС Э-60 использовалась ОС RSX-11S.

Появление в конце 80-х годов персональных ЭВМ (ПЭВМ), в первую очередь IBM PC/AT, и их резкое удешевление в 90-е годы стимулировало построение малых и средних СУ на их базе. Стандартная операционная система (MS DOS а затем Windows), стандартные средства связи между ЭВМ, стандартный интерфейс с пользователем резко уменьшили объемы вновь создаваемого ПО и цену системы. Отсутствие операционной системы реального времени не было препятствием при создании относительно медленных систем управления объектами наподобие криогенного комплекса или стенда испытания магнитов. Однозадачность операционной системы преодолевалась специализированным монитором реального времени, обеспечивающим одновременное выполнение функций контроля оборудования и операторской консоли.

Унифицированные структурные схемы и коммуникационное оборудование систем управления

Выбор структурных схем системы управления конкретными объектами в рамках принятой двухуровневой организации вычислительных средств и стандартного интерфейса определялся сложностью объекта и характером решаемых на нем задач.

На первом стенде исследования моделей СП-магнитов измерялись только температура и давление в ряде точек. Этой задаче соответствует простейшая структура СУ [5]. Датчики присоединены к соответствующим модулям обработки сигналов в каркасе СУММА. Каркас, в свою очередь, связан с ЭВМ СМ-4 через разработанные в ИФВЭ каркасный контроллер КС-30 и две интерфейсные платы КС-30СМ. ЭВМ осуществляла запись цифровых сигналов, последующую обработку их и вывод информации на алфавитно-цифровой дисплей. Здесь ком-

муникационные функции, т.е. связь интерфейсной электроники с ЭВМ выполняла стандартная ветвь КАМАК/Вектор.

Развитие этого стенда потребовало ввода в СУ дополнительных вычислительных мощностей в виде микроЭВМ Э-60 и также интеллектуального каркасного контроллера АКК-83 [6, 7]. Была организована структура вычислительных средств типа “звезда” с СМ-4 на верхнем уровне.

Линии связи между ЭВМ должны были обеспечивать загрузку программ в ЭВМ нижнего уровня, прием необходимых данных от них, рассылку команд, обмен данными между ЭВМ верхнего уровня. В 80-е годы доступны были только последовательные линии связи типа “токовая петля” или RS-232 с частотой до 19,2 кБод и топологией точка-точка.

На **рис. 1** приведена структурная схема системы управления стендами исследования мишеней УНК (СИМ) и магнитных измерений (СМИ) типа “двойная звезда”, включающая в себя две ЭВМ верхнего уровня, к каждой из которых через мультиплексор присоединены по несколько ЭВМ нижнего уровня, управляющих отдельными подсистемами стендов [8, 9].

Структурные схемы распределенных систем

В крупных ускорителях электрофизическое оборудование часто распределено на значительной площади, а длина кабелей, соединяющих пульта управления с различными группами оборудования, может достигать многих сотен метров. Для объекта, обеспечивающего в регулярных сеансах работу экспериментальных установок, такого, например, как каналы частиц, требовались надежные и быстрые системы связи. Во многих случаях необходимо также было обеспечить множественный доступ к ЭВМ со стороны нескольких пультов управления. При этом магистраль должна обеспечивать:

- двунаправленный обмен данными со скоростью десятков кБод,
- возможность подключения десятков удаленных устройств,
- детерминированность, т.е. гарантированное время доставки данных.

Последовательная магистраль КАМАК применялась в ряде лабораторий, имелся опыт применения и в ИФВЭ [10]. Недостатком является то, что управляющий контроллер ограничен рамками КАМАК, кроме того, протокол магистрали весьма сложен и не поддерживался отечественными интерфейсными микросхемами.

Учитывая изложенное выше, были разработаны два новых типа магистралей, обеспечивающих: а) связь между ЭВМ; б) связь между ЭВМ и группой распределенного оборудования, позже названная полевой магистралью.

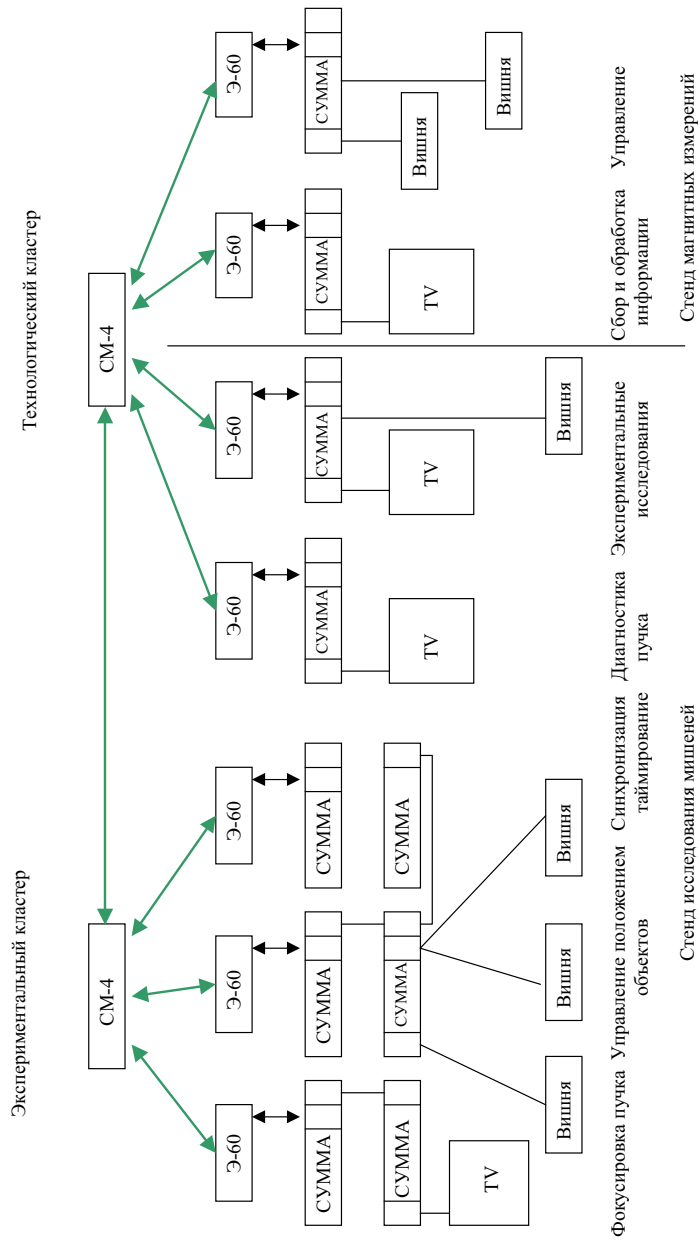


Рис. 1. Структура СУ типа «двойная звезда».

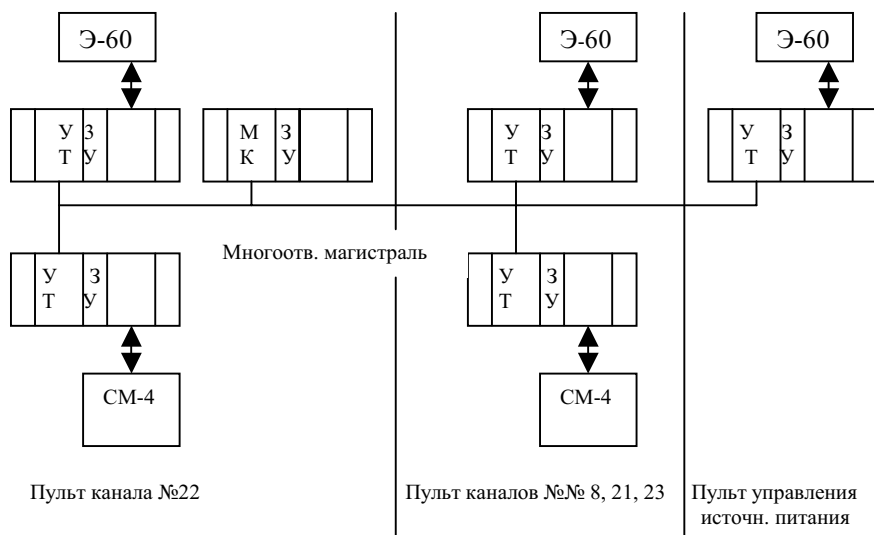


Рис. 2. Полудуплексный мультиплексный вариант магистрали; МК – магистральный контроллер, УТ – удаленный терминал, ЗУ – память.

За аналог была принята магистраль, соответствующая стандарту MIL 1553, основанному на последовательном биполярном двухуровневом фазо-манипулированном самосинхронизирующемся коде Манчестер-2. Эта магистраль обладала очень высокой надежностью и уже применялась в ЦЕРНе в качестве полевой магистрали для связи ЭВМ с оборудованием. Полудуплексный мультиплексный вариант магистрали [11] приведен на **рис. 2**. Магистраль управлялась магистральным контроллером (МК) – модулем СУММА, работающим под управлением интеллектуального контроллера. 31 удаленный терминал (УТ) обменивался сообщениями с МК или друг с другом через МК. Каркасный контроллер взаимодействует с МК или с УТ через модуль статической памяти ЗУ.

Для связи ЭВМ с оконечным устройством СУ, включающим в себя ЦАП, входные и выходные регистры, была разработана аппаратура симплексного мультиплексного канала передачи данных на базе того же стандарта. Три магистральных контроллера в корпусе СУММА осуществляют раздачу цифровых уставок системам авторегулирования источников питания магнитных элементов.

СУ на базе локальной сети передачи данных

Появление в конце 80-х годов локальной сети Ethernet резко улучшило коммуникационные возможности СУ. Стало реальным построение недорогой и быстродействующей двух- и трехуровневой вычислительной среды с РС/АТ в качестве сервера, ЭВМ среднего уровня (так называемых ЭВМ переднего края), а также операторской консоли на верхнем уровне [12 -14].

Как отмечалось выше, это не обязательно затрагивало более консервативный уровень интерфейсной электроники. Он, по-прежнему, мог быть представлен интеллектуальным каркасным контроллером. Такой была разработана система управления стендом калибровки СП-магнитов УНК (**рис. 3**). Аналогичным образом выполнена промежуточная версия модернизированной СУ каналов частиц.

Некоторые тенденции развития систем управления и модернизация системы управления комплексом каналов частиц

При разработке современной системы управления комплексом каналов полезно рассмотреть тенденции и перспективы развития СУ электрофизических установок с точки зрения трехуровневой модели их организации.

Программной основой верхнего уровня крупных СУ являются распределенные системы (Distributed Control System, DCS), построенные, как правило, по архитектуре клиент – сервер. Одной из наиболее известных систем этого класса является EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System), система, созданная около 10 лет назад и развиваемая десятком лабораторий мира.

Альтернативой являются коммерческие системы SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition System), доступные от многих производителей и используемые в основном в промышленности. Крупные проекты (LHC в CERN или TESLA в DESY) проводят сравнительные оценки их для выбора оптимального варианта. Аппаратной основой верхнего уровня являются, как правило, высокопроизводительные рабочие станции и многопроцессорные системы.

Вычислительные средства среднего уровня решают задачи связи и сопряжения различных протоколов между нижним и верхним уровнями, предварительную обработку данных, управление отдельными подсистемами. На этом уровне в промышленности широко применяются две достаточно мощные и гибкие магистрально-модульные системы – VME и Compact PCI (CPCI).

Поскольку работа СУ происходит в реальном времени как на среднем, так и на нижнем уровнях, требуются операционные системы реального времени (ОСРВ). Они характеризуются, прежде всего, малым (единицы-десятки микросекунд) временем реакции на внешние события. Как правило, это многопользовательские многозадачные ОС, построенные по технологии микроядра с возможностью размещения в памяти самого ядра сетевого и графического обеспечения, драйверов и прикладных программ. Это особенно важно для встроенных бездисковых систем. К наиболее распространенным ОС РВ относятся OS-9/OS-9000, VxWorks, PDOS, LynxOS, Linux, QNX, pSOS+. Одной из тенденций последних лет стало широкое внедрение в СУ новой ОС Linux, удовлетворяющей многим требованиям систем реального времени.

В сфере коммуникационных средств следует отметить постепенный переход от простых последовательных полевых магистралей к промышленным сетям с 7-уровневой моделью ISO/OSI. Лидером европейского рынка промышленных применений является Profibus, объединяющий три совместимых и взаимодополняющих протокола (DP, FMS и PA). Profibus и WorldFIP рекомендованы в качестве двух основных стандартов полевых магистралей для СУ коллайдера LHC в CERNе. Сети CANopen и Device Net используют один и тот же широко применяемый в Европейской автомобильной промышленности протокол CAN на двух нижних уровнях. В СУ физических центров в Европе (DESY, CERN) имеется положительный опыт разработок на основе стандарта CAN, причем в DESY это совместная разработка с ИФВЭ. Эти обстоятельства наряду с простотой структуры и высокой надежностью передачи данных делают CAN предпочтительным средством из числа имеющихся промышленных стандартов для нижнего уровня вновь СУ электрофизических установок.

В качестве средства связи ЭВМ, организации локальных сетей в настоящее время ведущее положение занимает сеть Ethernet с протоколом TCP/IP.

Выше мы рассмотрели магистрально-модульную систему Compact PCI как один из результатов развития технологии персональных ЭВМ. В качестве второго применения этих технологий можно выделить промышленные ПЭВМ, реализуемые на базе пассивных объединительных магистралей, и одноплатные ЭВМ (Single Board Computers, CBS). Промышленные ПЭВМ являются, по существу, разновидностью магистрально-модульных систем, совместимых с магистралью ISA и PCI настольных ПЭВМ, но адаптируемых для промышленных применений. Промышленные и одноплатные ЭВМ в различном конструктивном исполнении широко используются в промышленности и стали более дешевой альтернативой таким системам, как VME и Compact PCI.

На нижнем уровне СУ также широко применяются программируемые логические контроллеры (ПЛК) на основе микропроцессоров. Предполагается, в частности, их использование на всех крупных технологических системах LHC (вакуумная, криогенная, квенч-защита СП-магнитов и др.).

Модернизация системы управления комплексом каналов выведенных из ускорителя У-70 частиц

Некоторые из выделенных выше тенденций были учтены при разработке новой СУ комплекса каналов частиц [15, 16]. Структурная схема системы приведена на **рис. 4**. Для организации гибкого графического интерфейса с пользователем, построения различных архитектур типа клиент–сервер, обеспечения унифицированного доступа к контроллерам оборудования выбрана система EPICS.

В аппаратную основу системы управления закладывается трехуровневая организация вычислительных средств, базовая для EPICS. Эта конфигурация включает в себя персональные ЭВМ на верхнем уровне, унифицированные бездисковые контроллеры, выполняющие функции серверов и ЭВМ переднего края, на среднем уровне и контроллерами оборудования на нижнем.

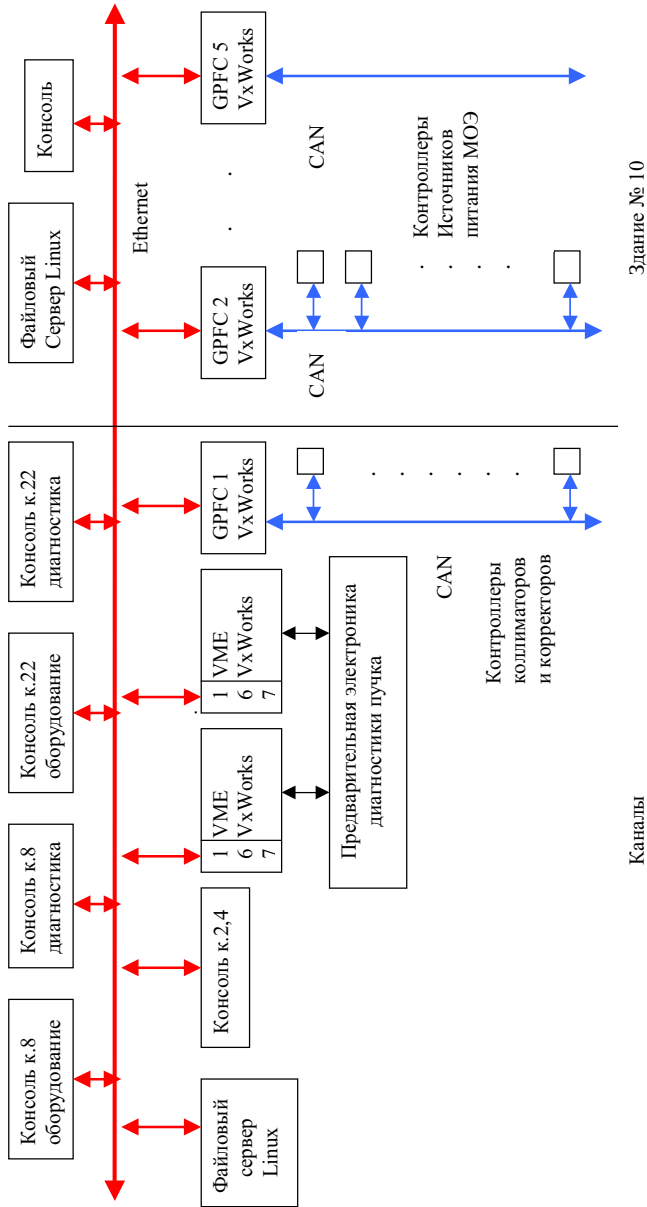


Рис. 4. Структурная схема модернизированной системы управления каналами частиц ускорителя У-70: МОЭ – магнитооптический элемент, CAN – полевая магистраль, GPFC – контроллер полевой магистральной модуль 167 – каркасный контроллер.

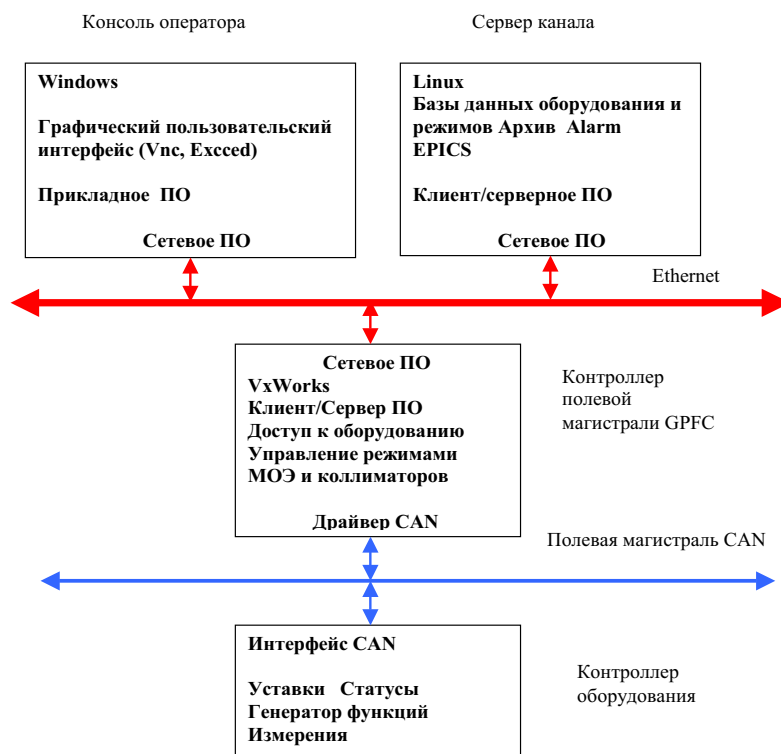


Рис. 5. Структура ПО канала.

Обмен данными между ЭВМ осуществляется по сети Ethernet, контроллеры оборудования присоединяются к ЭВМ, через полевую магистраль CAN. Одна из ПЭВМ каналов выполняет функции файлового сервера и обеспечивает хранение базы данных оборудования и режимов его работы, доступ к оборудованию, обработку собираемой информации для ее отображения, начальную загрузку УК, архивацию данных и т.д. Консольные ПЭВМ на едином пульте (раздельных пультах) управления каналами обеспечивают представление оперативных данных и анализ архивных данных. В здании источников питания одна из ПЭВМ также выполняет функции файлового сервера, обеспечивая управление источниками питания МОЭ с пульта каналов по сети Ethernet. Другая ПЭВМ выполняет функции операторской консоли. В качестве операционной системы ПЭВМ будет использована ОС Linux. Структурная схема программного обеспечения приведена на рис. 5.

Для управления источниками питания МОЭ, корректирующих магнитов, коллиматоров и другого оборудования разработаны интеллектуальные контроллеры оборудования, которые включают в себя ЦАП и АЦП, регистры входных и выходных дискретных сигналов, интерфейс с полевой магистралью CAN, в качестве элементной базы контроллера принят микропроцессорный набор I8051.

Контроллером магистрали CAN служит контроллер GPFC (General Purpose Front-end Controller), представляющий собой совместную разработку ИФВЭ и ДЕЗИ. Он обеспечивает доступ к технологическому оборудованию с верхнего уровня по сети Ethernet, сбор данных (ОК) и рассылку новых уставок. Всего потребуется 5 контроллеров GPFC. В качестве операционной системы использована операционная система реального времени VxWorks. Новая система находится в стадии реализации, заменен верхний уровень системы, тиражируются и внедряются контроллеры оборудования.

Результаты анализа и выводы

Разработан и выбран из доступных элементов унифицированный набор программно-аппаратных средств автоматизации. Унифицирована, прежде всего, структура систем управления, включающая в себя многоуровневую организацию вычислительных средств, стандартные коммуникации, стандартную интерфейсную аппаратуру. Интерфейсная электронная аппаратура унифицируется по электрическим, логическим и механическим параметрам, что обеспечивает ее переносимость и комплексированность в зависимости от объема измерений и управления и от особенностей объекта. За основу на начальном этапе была выбрана магистрально-модульная система ВЕКТОР/СУММА и система MULTIBUS 1 в последующем. Для сильноточной, а также не требующей магистрально-модульной организации электроники выбран широко распространенный в ИФВЭ конструктив «Вишня».

Вычислительные средства верхнего и среднего уровней строятся на базе производимых промышленностью в 80-е годы ЭВМ серии СМ и программно совместимых с ними микроЭВМ «Электроника-60» и микропроцессоров 1801ВМ. Широкое распространение персональных ЭВМ в 90-е годы при резком их удешевлении обусловило их внедрение на верхнем и среднем уровнях СУ небольших и средних объектов.

Унификация распространяется и на коммуникационные средства и протоколы обмена между вычислительными средствами разных уровней, а также между вычислительными средствами и интерфейсной электроникой. Для построения быстродействующей и высоконадежной среды передачи данных выбрана полевая магистраль на основе стандарта MIL 1553. На ее основе построены полудуплексный и симплексный мультиплексные каналы передачи данных.

В третьей главе описываются электронные средства измерения и управления электрофизическим оборудованием.

Как уже упоминалось, к началу работ по созданию системы управления стендами исследования оборудования УНК, а также каналами выведенных из ускорителя У-70 частиц в стране не существовало рынка интерфейсной электроники для систем управления. Отдельные типы модулей могли быть позаимствованы из систем сбора данных в эксперименте. Для реализации же всех функций измерения, управления и обработки данных автору совместно с коллективами, занятыми реализацией конкретных систем, потребовалось формулировать технические задания на разработку большого набора электронных модулей и специализированных приборов и систем (ниже описаны основные из них). Приборы и системы, входящие в состав высокочастотного сепаратора антипротонов, разработаны с участием диссертанта.

Средства управления источниками питания магнитных элементов

Источники питания (ИП) магнитных элементов – отклоняющих магнитных диполей, квадрупольных линз – представляют собой электромашинные или полупроводниковые преобразователи, снабженные встроенной системой регулирования, обрабатывающей сигнал опорного напряжения, генерируемый СУ. В задачи СУ входят также измерение токов МОЭ, измерение и управление полярностью, обеспечение процедуры регулирования по одной и той же петле гистерезиса для теплых поворотных магнитов.

Для каналов частиц с более чем сотней ИП и требуемой точностью измерения тока 10^{-3} для линз и 10^{-4} для поворотных магнитов в начале 80-х годов, когда высокоразрядные АЦП были еще недоступны, адекватным решением было применение цифрового вольтметра (ЦВ) с аналоговым коммутатором для измерения напряжений на шунтах и опорных напряжений. Электроника, кроме того, включала в себя каркас СУММА, обеспечивающий связь с ЭВМ, интерфейсную плату ЦВ, контроллер управления полевой магистралью, а также модуль для обеспечения процедуры регулирования тока магнита по одной петле гистерезиса. В шкафу каждого ИП располагался цифровой источник опорного напряжения (ЦИОН), управляемый через полевую магистраль.

При разработке комплекта электронных модулей системы управления стендами исследования магнитов УНК учитывалось, что этот комплект должен стать прототипом подсистемы управления основным магнитом УНК. Такой комплект включает в себя модули СУММА:

- функциональный генератор на основе 18-разрядного ЦАП и микропроцессора 18013ВМ2;
- 18-разрядный интегрирующий АЦП со временем измерения 40 мс для измерения тока;
- 16-разрядный АЦП с временем нарастания 25 мкс для измерения нарастания и спада тока;

- 12-разрядный АЦП со встроенным аналоговым коммутатором для измерения прочих параметров ИП;
- 20-разрядный ЦАП для поверки и настройки высокоразрядных ЦАП и АЦП.

Электроника для магнитных измерений

Система управления стендами магнитных измерений обеспечивает измерения магнитных полей несколькими методиками.

Измерения с помощью датчика Холла

Модули СУММА обеспечивают:

- стабилизацию тока для питания датчика;
- стабилизацию температуры датчика с точностью 0,1 градуса;
- управление перемещением платформы с датчиком по трем координатам;
- измерение ЭДС датчика с погрешностью не более 0,001%.

Измерения величины магнитного поля с помощью датчика, использующего ядерно-магнитный резонанс (ЯМР)

В состав системы управления датчиком ЯМР входят модули СУММА:

- управления высокочастотным модулем датчика с автоматическим поиском резонанса и слежением за ним;
- измерения частоты до 100 МГц с погрешностью не выше 0,001%.

Измерения полей с помощью гармонических катушек (ГК)

В состав системы управления входят модули СУММА:

- модуль управления шаговым двигателем для перемещения катушек;
 - модуль управления коммутатором-усилителем;
 - 16-разрядный аналого-цифровой интегратор для преобразования напряжения с выхода коммутатора-усилителя в частоту и счета импульсов;
 - генератор синхроимпульсов для модуля управления шаговым двигателем;
 - цифровой компаратор угла для преобразования информации с датчика вал-код и синхронизации интегратора;
- модули в корпусе «Вишня»:
- коммутатор-усилитель сигналов с индукционных датчиков (входной ток 100 пА, дрейф нуля 3 мкВ, напряжение шума 30-50 нВ в полосе 10 кГц);
 - силовой блок шагового двигателя.

Электроника измерения и управления криогенными параметрами

К основным криогенным параметрам, требующим непрерывного контроля, относятся измерения температуры, давления, уровня жидкого криопродукта, и его расхода, вакуума, степени открытия регулирующих вентилях.

Для измерения температуры использовались платиновые датчики типа ТСП для измерений в диапазоне 20–50 К, резисторы ТВО, германиевые ТПК и арсенид-галлиевые датчики ТСАД для измерений в диапазоне 3,5–50 К. Принцип работы базировался на измерении сопротивления датчика при питании его постоянным током по четырехпроводной схеме.

Разработаны модули:

- четырехканальный измеритель сопротивления для датчиков типа ТСАД, ТПК, ТВО с погрешностью измерения менее 0,1%;
- восьмиканальный измеритель напряжения на диодных датчиках с погрешностью измерения менее 0,3%.

Измерение давления осуществлялось 16-канальным измерителем, преобразующего сигнал с датчика типа «Сапфир» в напряжение с точностью 0,1%.

Измерение вакуума осуществлялось 8-канальным измерителем, преобразующим сигнал с манометрической лампы ПМТ-4М с точностью 1%.

Измеритель уровня жидкого гелия основан на измерении сопротивления вертикального сверхпроводника – уровнемера, точность измерения уровня 1%.

Двухканальный счетчик оборотов турбодетандера ТУРБ-2.

Электронные модули для исследования характеристик СП- магнитов

Для исследований характеристик магнитов использовался набор СУММА, дополненный специфическими модулями.

Измеритель активной мощности, рассеиваемой СП-магнитом на фоне больших индуктивных напряжений на обмотке магнита. В измеренном сигнале напряжения на магните выделяется активная компонента, а также ток через магнит, вычисляется произведение этих величин. Достигнута линейность 0,1% в диапазоне 70 дБ.

Измеритель давления в элементах обмоток СП-магнита. Прибор измеряет емкость 12 бескорпусных майларовых конденсаторов, интегральная нелинейность не превышает 0,8%.

Приборы для контроля перехода СП-магнита в нормальное (резистивное) состояние:

- четырехканальный программируемый масштабный усилитель-делитель;
- изолированный 12-разрядный АЦП;
- изолированный 16-разрядный АЦП;
- управляемый источник тока для питания нагревателей в расходомерах и имитаторе тепловой нагрузки криогенных систем;
- генератор для синхронизации измерений, блок обработки событий.

Электроника контроля вакуума и управления вакуумным оборудованием

Особенностью *измерения вакуума* является широкий диапазон измерения (5 декад) и необходимость изоляции цепей управления от источника высоковольтного питания. Разработаны модули для измерения вакуума:

- термоэлектрический для измерения вакуума в диапазоне $2 \times 10^{-1} - 10^5$ Па;
- электроразрядный для диапазона $1 - 10^{-7}$ Па;
- электроразрядный для диапазона $10^{-1} - 10^{-11}$ Па.

Блок управления клапан-дозатором для установки потока газа при напуске в вакуумную систему и поддержания давления (конструктив «Вишня»).

Электроника стенда исследования мишеней с высокой плотностью энерговыделения

В силу специфики задачи, в основном были разработаны специальные модули (всего 25 типов) как в стандарте СУММА (быстрый 7-разрядный АЦП, модуль измерения температуры, модули синхронизации, размножения синхроимпульсов, обработки телевизионных изображений, управления и измерения напряжения на конденсаторе), так и разомкнутые и замкнутые приводы для шаговых двигателей в конструктиве «Вишня».

Системы стабилизации напряжения импульсных модуляторов

Задачи, связанные с импульсными модуляторами, решались применительно к высокочастотному сепаратору для облучения жидководородной пузырьковой камеры «Людмила» [17, 18].

Требования к стабильности параметров сепаратора вытекают из компенсационного принципа его работы: поскольку сепарация заключается в компенсации отклонения и последующем поглощении нежелательных частиц, очевидно, что уход амплитуды или относительной фазы отклоняющего поля любого из дефлекторов от установленного значения вызывает уширение профиля пучка нежелательных частиц и вынуждает увеличивать размер поглотителя с потерей выделяемых частиц.

Кроме того, высокочастотный сепаратор может служить наиболее точным инструментом для определения импульса частиц в канале. Так как измеряемой величиной при этом является разность фаз колебаний в дефлекторах, малая погрешность измерения импульса может быть достигнута при жестких требованиях к стабильности разности фаз от импульса к импульсу и в течение импульса. Последние два обстоятельства определяют необходимость улучшения стабильности напряжения питания клистронных усилителей.

Стабилизация плоской части высоковольтного импульса напряжения

Импульсное питание оконечного мощного клистрона сепаратора КИУ 12 выполнено по схеме с зарядной линией и импульсным трансформатором. Расчеты показали, что с учетом ряда мер по стабилизации остальных параметров сепаратора стабильность напряжения мощного 60-МВт модулятора должна быть на уровне $\pm 0,15\%$. Задача измерения импульса частиц в канале обязывала понизить эту величину еще в 2-3 раза [19].

Измерения показали, что импульсные модуляторы с трансформаторами не обеспечивают стабильность плоской части импульса лучше 0,15%. Твердотельные ограничители напряжения, применяемые на ЛЭП, не обеспечивали стабили-

зации из-за разогрева за время импульса [20]. Потребовалось углубленное изучение процессов, происходящих в импульсном трансформаторе.

Измерения на малом уровне мощности показали, что при коммутации заряженной линии на импульсный трансформатор во вторичной обмотке последнего за счет емкостной связи с первичной обмоткой наводится потенциал, определяемый частичными емкостями. Вторичная обмотка может быть представлена в виде длинной линии, в которой имеют место многократные отражения от концов волн напряжения и тока и образование стоячих волн.

Радикальный метод подавления пульсаций – уменьшение межобмоточной емкости, например, за счет введения электростатического экрана между обмотками. Если конструкция трансформатора не позволяет этого, возможно значительное подавление пульсаций путем введения активного сопротивления с величиной, близкой к волновому сопротивлению обмотки трансформатора, со стороны, противоположной нагрузке. Такое сопротивление сокращает время существования пульсаций до одного периода. Чтобы устранить падение напряжения на этом сопротивлении на плоской части импульса, его необходимо шунтировать LC контуром, настроенным на основную частоту пульсаций, включение такого контура позволяет уменьшить амплитуду пульсаций по крайней мере в три раза.

Система стабилизации зарядного напряжения импульсных модуляторов

Основными дестабилизирующими факторами зарядного напряжения формирующей линии, помимо разброса температурных коэффициентов конденсаторов линии, компенсируемого подбором конденсаторов, являются конечная величина порции заряда, обеспечиваемого диодно-тиристорным ключом, нестабильность времени “догорания” ключа и нестабильность времени саморазряда линии через утечки и высоковольтный делитель.

Разработана, опробована и запатентована схема, обеспечивающая стабилизацию на уровне 0,01% за счет, минимизации величины порции, а также непрерывной компенсации саморазряда линии, независимо от времени срабатывания модулятора [21].

Измерение и ввод большой высокочастотной мощности в диафрагмированный волновод

В высокочастотных сепараторах необходимо стремиться к предельным полям в дефлекторах, так как это позволяет повышать качество сепарации, т.е. понижать уровень фона при сепарации сравнительно интенсивных частиц или повышать загрузку кадров при сепарации редких частиц. В связи с этим актуально было получение максимальной мощности от источников питания – клистронных усилителей путем оптимальной тренировки их, точное измерение мощности, а также обеспечение высокой электрической прочности вакуумированного диафрагмированного волновода и условий ввода в него большой ВЧ-мощности.

Экспериментальный ввод мощности в модель дефлектора доказал необходимость применения быстрой защиты от пробоев в дефлекторе, т.е. отключение

мощности в случае пробоя для ограничения разрушающего поверхность дефлектора действия пробоя.

Учитывая значительную длину электрического тракта усилительных каскадов, такое устройство должно быть расположено как можно ближе к нагрузке. Создать такое устройство в мощном 20-МВт тракте крайне сложно, поэтому местом расположения был избран 10-кВт волноводный тракт возбуждения окончного клистрона.

Устройство представляет собой управляемый волноводный разрядник в проходном полуволновом резонаторе при атмосферном давлении, образованный двумя парами индуктивных штырей в волноводе $72 \times 10 \text{ мм}^2$ [22]. Принцип его работы основан на пробое между широкими стенками волновода в максимуме электрического поля и вызванной пробоем расстройке резонатора.

Когда не требуется высокая скорость отключения ВЧ-мощности, предпочтительнее оказывается применение рпн-диодных модуляторов в маломощном преусилительном тракте [23]. Для повышения пробивной прочности клистрона применялся метод тренировки его подачей положительных импульсов напряжения на катод [24].

Для измерений высокочастотной мощности была использована детекторная головка на вакуумном диоде 6Д16Д, обладающем обширной квадратичной областью детектирования при мощностях до 4–5 мВт [25].

Выводы

Унификация интерфейсной аппаратуры состояла в применении для действующих каналов и стендов стандарта КАМАК/Вектор. Для системы управления ускорительно-накопительным комплексом был разработан базовый комплект интерфейсной электроники в стандарте MULTIBUS 1. Разнообразие задач измерения и управления при создании систем управления каналами пучков и стендами было таково, что, несмотря на унификацию, пришлось разработать свыше 100 типов электронных модулей, тираж их превысил 1000 единиц.

Меры по достижению сильных электрических полей в дефлекторах ВЧ-сепаратора позволили, в частности, обеспечить высокую чистоту сепарированного пучка антипротонов с импульсом 23 ГэВ/с для жидководородной пузырьковой камеры «Людмила». В этом пучке обеспечено получение 375 тысяч фотографий со средним содержанием антипротонов 4,5 на кадр. Примесь адронов в пучке не превышает 1%, мюонов – на уровне 2%.

Меры по обеспечению высокой стабильности мощных модуляторов позволили, в частности, добиться точности в измерении импульса сепарированных частиц лучше $\pm 0,5\%$.

В четвертой главе описываются системы управления каналами выведенных из ускорителя У-70 пучков частиц и стендами исследования и испытания обору-

дования УНК первой ступени, реализованные на базе разработанных комплексных средств автоматизации. СУ каналов создана в середине 80-х годов и в настоящее время модернизируется, СУ стендов создавались в 80–90-е годы.

Система управления каналами выведенных из ускорителя У-70 частиц

Для исследований в области физики высоких энергий выведенные из ускорителя У-70 пучки частиц транспортируются к экспериментальным установкам специальными каналами транспортировки. В состав каналов включаются десятки единиц оборудования такого, как поворотные, корректирующие магниты, фокусирующие линзы, коллиматоры пучка, приборы диагностики пучка, различное технологическое оборудование (вакуумная система, система охлаждения и т.д.). Оборудование находится в различных зданиях и разнесено на сотни метров.

Первый опыт создания СУ был получен на канале, формирующем пучки антипротонов и каонов для жидководородной пузырьковой камеры «Мирабель».

Расширение экспериментальной базы ИФВЭ, создание новых экспериментальных установок «Комплекс меченых нейтрино», СФИНКС, ФОДС, СВД и др. обусловили создание новой системы каналов выведенных из ускорителя частиц. Возросла сложность оборудования каналов, появилась необходимость перераспределения оборудования между каналами.

Пульты располагаются в разных местах главного экспериментального зала и галереи и разнесены на значительные расстояния. Источники питания магнито-оптических элементов (МОЭ) расположены в отдельном здании с местным пультом управления ими, отстоящем от экспериментального зала на расстоянии 300-400 метров.

На начальном этапе набор оборудования системы каналов включал в себя 71 МОЭ (поворотные магниты и квадрупольные линзы), 12 корректирующих магнитов, 15 коллиматоров.

Состав оборудования со временем мог меняться. Кроме того, необходим был множественный доступ к различным видам оборудования со стороны различных пользователей. Это предопределило разработку универсальной СУ с гибкой и открытой структурой. Структурная схема системы основывается на применении полудуплексной магистрали связи ЭВМ между собой и симплексной мультимплексной магистрали связи ЭВМ с оборудованием, описанных в главе 2.

Подсистемы представляют собой модульные конструкции, позволяющие легко изменять и дополнять состав и функции системы.

Подсистема управления технологическим оборудованием каналов предназначена для управления коллиматорами, корректирующими магнитами, приводами профилометров, полярностью МОЭ.

Подсистема управления МОЭ базируется на микроЭВМ Э-60. Информация в цифровые источники опорного напряжения (ЦИОН) поступает по магистралям,

как и в схеме управления корректирующими магнитами. В системе используются три многоотводные магистрали.

Программное обеспечение

В качестве операционной среды ЭВМ СМ-4 применялась RSX -11M. Для микроЭВМ использовалось ядро реального времени для программирования на языке Модуля-2, занимающее в минимальной конфигурации всего 1500 байт. Программное обеспечение СУ МОЭ представляет собой самостоятельные программы, загружаемые из ЭВМ канала или из внешнего ПЗУ.

Модернизированная СУ каналов

Техника 80-х годов не позволяла удовлетворить все запросы пользователей к качеству управления каналами. Так, оставалась невозможной одновременная установка режимов многих элементов, затруднен одновременный доступ к управлению источниками питания с пультов различных каналов.

В 2000-2001 гг. осуществлена модернизация верхнего уровня СУ – вычислительной техники и ПО. ЭВМ Э-60 заменены на ПЭВМ РС/NT, которые соединены локальной сетью Ethernet.

Программное обеспечение системы управления токами магнито-оптических элементов и частью технологического оборудования каналов вторичных пучков частиц разработано с помощью Visual C++/Visual Basic в среде MS Windows 98/NT с использованием клиент-серверного подхода, основанного на технологии DCOM. Решены проблемы, связанные с одновременным доступом нескольких пользователей к источникам питания МОЭ и технологическому оборудованию каналов вторичных пучков частиц. Разработаны алгоритмы для комплексного обмена данными между персональными компьютерами в различных зданиях

В 2002-03 гг. реализуется новая СУ, описанная во второй главе.

Системы управления стендами исследования и испытания оборудования УНК первой ступени

Работа с оборудованием УНК на стендах должна была дать опыт как для разработки самого ускорителя, так и для системы управления. Значительная часть интерфейсной электроники и рабочих программ после доработок должна была войти в состав системы управления УНК.

Система управления стендом исследования мишеней

Стенд предназначался для изучения теплофизических процессов в мишенях, испытывающих радиационный нагрев под воздействием высокоинтенсивного протонного пучка малых поперечных размеров. Подлежали автоматизации следующие системы стенда:

- фокусировки протонного пучка;
- диагностики и мониторингования протонного пучка;
- положения объектов стенда;
- телевизионного наблюдения и синхронизации.

Для создания пучка протонов с поперечными размерами до 0,6 мм используется короткофокусная литиевая линза, подключенная к генератору импульсного

тока (ГИТ). Подсистема управления ГИТ реализована на базе ЭВМ Э-60 и каркаса СУММА, встроенных в ГИТ и находящихся под его потенциалом. Подсистема связывается с СУ оптоволоконной линией связи.

Разработанный набор модулей СУММА обеспечивает:

- управление величиной напряжения на конденсаторной батарее;
- измерение напряжения на батарее;
- измерение величины и формы импульса тока с шунта ГИТ.

Запуск ГИТ синхронизован с работой ускорителя.

Мониторирование пучка проводилось с помощью телевизионной системы. Для мониторинга выхода вторичных частиц с мишени применялся сцинтилляционный счетчик в интегрирующем режиме. Для управления положением объектов (мишени, контейнеры, привод литиевой линзы, профилометры) разработаны приводы на основе шаговых двигателей с замкнутой (мощный привод) и разомкнутой (маломощный привод) петлями обратной связи.

Система управления [8, 9] построена на базе многомашинного комплекса, состоящего из технологического и экспериментального кластеров ЭВМ (рис. 1).

Программное обеспечение СУ стенда имеет 3-уровневую структуру. На первом высшем уровне находится управляющая программа, задающая режим работы и алгоритмы измерений. На втором уровне находятся функциональные пакеты, созданные в ИФВЭ или адаптированные. На третьем уровне находятся драйверы экспериментальной аппаратуры, линии связи с ЭВМ и других нестандартных внешних устройств.

Системы управления стендами магнитных измерений теплых магнитов

Система управления должна обеспечить измерения магнитных полей несколькими методиками.

Измерения с помощью датчика Холла применяются для изучения топографии магнитного поля на концах дипольных магнитов, в полях сложной формы. Датчик Холла перемещается шаговыми двигателями на платформе по 4 координатам, точность линейного позиционирования 0,1 мм, углового – 0,1 мрад.

Система управления должна обеспечивать:

- стабилизацию тока для питания датчика;
- стабилизацию температуры датчика с точностью 0,1 градуса;
- управление перемещением платформы по четырем координатам;
- измерение ЭДС датчика с погрешностью не более 0,001%.

Измерения величины магнитного поля с помощью датчика, использующего ядерно-магнитный резонанс (ЯМР), применяются главным образом для измерений эффективной длины магнита, а также для калибровки датчиков Холла.

Система управления ЯМР датчиком должна обеспечивать:

- управление высокочастотным модулем датчика с автоматическим поиском резонанса и слежением за ним;
- измерение частоты ЯМР до 100 МГц с погрешностью не выше 0,001%.

Измерения полей с помощью гармонических катушек (ГК) служат для определения интегральных характеристик магнита. В постоянных магнитах измеряется амплитуда сигнала с ГК при повороте катушки в магнитном поле (до 8 оборотов, 64 положений на оборот и 15 уровней тока).

Система управления должна обеспечивать:

- управление вращением и перемещением ГК;
- измерение угла поворота ГК;
- измерение амплитуды сигнала с ГК;
- интегрирование сигнала по времени.

Методом натянутой струны измеряются эффективная длина магнита, интегральная неравномерность поля, положение медианной плоскости для диполей, оптической оси для многополюсных магнитов, для СП-магнитов измеряются динамические потери и мультипольные динамические добавки.

На **рис. 6** приведена структурная схема магнитных измерений теплых магнитов 1-й ступени УНК. Для связи используется сетевой интерфейс СП-15 (DL Ki/Si) под управлением программного интерфейса АЛИСА. Технологические ЭВМ Э-60 управления источниками питания имеют периферийную последовательную связь с ЭВМ «своего» стапеля, таким способом обеспечивается программная синхронизация процесса измерений с уставкой тока в магните.

Выводы

Система управления каналами (№№ 8, 21, 22, 23) выведенных из ускорителя У-70 пучков частиц в различных режимах вывода находилась в эксплуатации в течение более 10 лет. Она обеспечила проведение комплекса исследований в области адронной спектроскопии на установке СФИНКС, исследования свойств нейтрино на установке «Нейтринный детектор» и «Комплекс меченых нейтрино», исследование процессов одиночного и парного образований частиц с большими поперечными импульсами на установке ФОДС-2, исследования по поиску кандидатов в распады очарованных частиц на установке СВД, а также ряд других научных и методических исследований.

Всего в ИФВЭ были автоматизированы стенд исследования мишеней и два стенда магнитных измерений на теплых магнитах.

В пятой главе описываются системы управления стендами исследования сверхпроводимости, измерения характеристик СП-магнитов, управления криогенными комплексами для обеспечения сверхпроводимости, а также образец промышленного применения научных разработок в области сверхпроводимости.

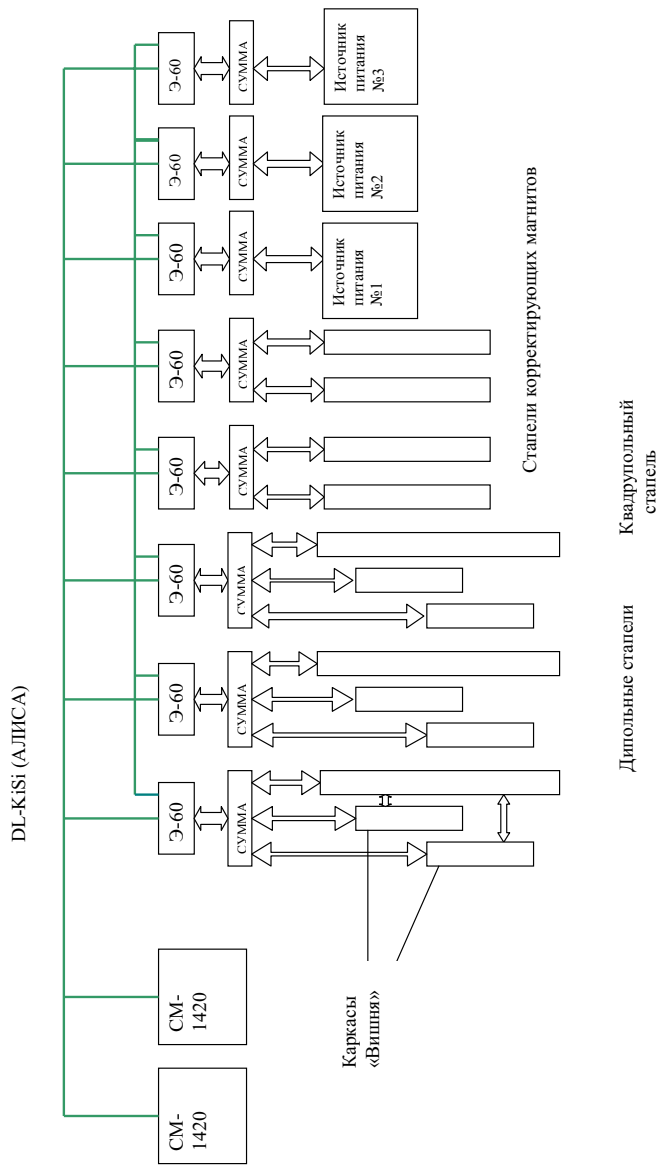


Рис. 6. Структурная схема системы управления стендом испытания теплых магнитов УНК.

Создаваемый в ИФВЭ УНК второй ступени на 3 ТэВ был первым в отечественной практике крупным сверхпроводящим проектом. Определенный опыт зарубежных ускорителей с СП-магнитами и, прежде всего, FNAL (США) не давал ответов на многие вопросы, связанные с созданием и поддержанием в рабочем состоянии конкретных СП-магнитов УНК, прежде всего, в силу различий в конструкции и технологии изготовления СП-магнитов. Исследованию подлежали вопросы, связанные с конструированием магнита, механическими напряжениями и температурными полями в нем, криогенным обеспечением его в статическом и переходных режимах, питания его электрическим током, потерями энергии в нем, эвакуацией энергии из магнита при квенч-переходе, и ряд других вопросов.

Исследования последовательно велись на ряде стендов в теплом режиме под воздействием малых токов, а также в криостатах в погружном и прокачном режимах.

Системы управления стендами исследования характеристик сверхпроводящих магнитов

Первая автоматизированная система измерения параметров СП-магнитов применена для погружных испытаний макетов магнита.

Испытания полномасштабных магнитов в прокачном режиме были новым этапом исследований и, как правило, включали в себя следующие стадии:

- тренировка СП-магнита, включая анализ квенч-перехода;
- управление источником тока, возбуждающего магнит;
- измерение динамических потерь в магните;
- измерение давления в элементах обмотки;
- измерение теплофизических параметров.

Измерялись температура и уровень жидкого гелия в криостате, активная мощность, рассеиваемая СП-магнитом при квенч-переходе, давление в элементах обмотки при срыве тока при переходе. Большой объем измерений, накопления данных для последующей обработки, управление наряду с ограниченными возможностями ЭВМ СМ-4 и Э-60 как по мощности, так и по каналам ввода-вывода, обусловили разработку двухуровневой схемы вычислительных средств, которая постоянно усложнялась. В последней конфигурации в ее состав входили три ЭВМ СМ-4 и 15 Э-60 (рис. 7).

Для регистрации процессов, происходящих в магните при квенч-переходе, включая некоторое предшествующее и последующее время, в том числе для измерения энергии, выводимой из магнита при переходе, разработан квенч-анализатор – набор модулей в каркасе СУММА под управлением автономного каркасного контроллера.

Анализатор регистрирует следующие процессы:

- ток через магнит;
- момент срабатывания датчика нормальной фазы;
- активную компоненту напряжения на магните;
- напряжение на разрядном сопротивлении;
- напряжение и температуру частей обмотки.

Для исследования взаимного влияния СП-магнитов при последовательном питании их током и охлаждении была создана цепочка из четырех магнитов.

Для изучения электрических и криогенных процессов при квенч-переходе в цепочке была создана 128-канальная система сбора данных. Она построена на базе персональной ЭВМ РС/АТ-386 и двух каркасов СУММА.

Системы управления криогенными комплексами

Криогенный комплекс предназначен для захолаживания, криостатирования и отогрева сверхпроводящей магнитной системы. Криогенная система обеспечивает циркуляционное охлаждение на двух температурных уровнях:

4,6 К – температура криостатирования жидким гелием обмоток магнитов;

80 К – температура криостатирования жидким азотом теплозащитных экранов.

Особенности управления криогенным оборудованием

Управление криогенным оборудованием – это новый класс задач, для решения которых разработанные ранее программно-аппаратные средства подходили лишь отчасти.

Можно отметить следующие особенности криогенного оборудования как объекта управления:

- традиционно отечественное криогенное оборудование управлялось вручную дистанционно, оно не имело встроенных электронных средств оцифровывания данных и цифрового управления;
- криогенное оборудование распределено по значительной площади, на которой может работать другое оборудование, создавая сильную электромагнитную помеху в дополнение к вибрации, создаваемой самим криогенным оборудованием;
- криогенный технологический процесс непрерывен в течение многих суток, выход на режим также занимает многие часы;
- для криогеники характерны множественные перекрестные связи, для управления это означает постоянно действующие петли обратных связей, в том числе между системами, управляемыми разными ЭВМ;
- криогенные процессы инерционны, даже при выходе измеряемого параметра за допустимые пределы не следует торопиться вводить корректирующее воздействие, прежде чем в течение нескольких циклов не будет выявлена тенденция изменения;
- алгоритмы управления иногда не поддаются точному математическому описанию, оператору должна быть предоставлена возможность пошагового выполнения программы по командам с пульта.

Системы управления стендами исследования криогенного оборудования

На первых криогенных стендах решались задачи двойного рода. Во-первых, изучалось само криогенное оборудование. Во-вторых, впервые создавались основы самой системы управления криогенным оборудованием.

На стендах в НПО «Криогенмаш» – основного поставщика криогенного оборудования для ИФВЭ – технологическое оборудование, подлежащее автоматизации, включало в себя: поршневой детандер, блок маслоочистки МО-800/80, блок низкотемпературной очистки НО-800, ожижитель гелия ОГ-400, рефрижератор гелия РГ-200.

Необходимо было регулярно производить измерения сигналов 207 датчиков температуры, давления, уровня жидкого азота и гелия, расхода жидкого азота и гелия, степени открытия регулирующих вентилей. Регистрироваться должны также 227 дискретных сигналов. Генерироваться должны 114 аналоговых и 109 дискретных управляющих воздействий.

Наличие среди криогенного оборудования функционально обособленных узлов (ожижитель, рефрижератор и т.д. с 40-60 аналоговыми и статусными сигналами, подлежащими обработке и управляющими воздействиями) и работа в режиме реального времени делали предпочтительной модульную организацию вычислительных средств. Один модуль управлял крупной технологической единицей (блоки маслоочистки, ожижитель, рефрижератор) или выполнял функции операторской консоли. В состав его входили микроЭВМ Э-60 с видеотерминалом, каркас СУММА с необходимым набором модулей.

Система управления криогенным комплексом стенда калибровки сверхпроводящих магнитов

Криогенный комплекс стенда калибровки СП-магнитов стал последним испытательным стендом перед тиражированием для УНК как технологического оборудования, так и самой системы управления. Опыт испытаний разработанных ранее программно-аппаратных средств показал, что качество интерфейсной электроники достигло необходимого уровня для работы в составе УНК, хотя не было достаточной статистики по надежности электроники. Учитывая это, а также высокую цену аварии криогенного оборудования, было принято решение о дублировании каркасов СУММА (один каркас ведет обработку данных, второй – в «горячем» резерве).

Система управления криокомплексом стенда калибровки должна обеспечить контроль за 972 аналоговыми параметрами, за 1031 дискретным и генерировать 565 управляющих воздействий. Структурная схема системы управления приведена на рис. 3. Система построена как трехуровневая. Нижний уровень составляет интерфейсная аппаратура СУММА с интеллектуальным контроллером. Контроллер базируется на микропроцессоре 1801 ВМ1 с операционной системой, «защитой» в модуле буферной памяти каркаса и загружаемой в контрол-

лер автоматически при включении ЭВМ. Средний уровень составляют двенадцать ЭВМ IBM PC/AT, и на верхнем уровне две ЭВМ VAX.

Система разделяется на три идентичные, практически автономные подсистемы, управляющие различными группами оборудования. Персональные ЭВМ подсистем связаны между собой и с ЭВМ верхнего уровня магистралью Ethernet. В свою очередь, каждая подсистема разбита на группы с близкими количествами обрабатываемых сигналов. Группа включает в себя персональную ЭВМ и два каркаса СУММА, подключаемые к ЭВМ линиями RS 232 через мультиплексор. Всего таких станций 12. ЭВМ выполняет функции пульта управления «своим» оборудованием, в ней хранится и реализуется все программное обеспечение по контролю за технологическим оборудованием. ЭВМ VAX использовались первое время только как резервное хранилище программ.

ПО обеспечивало наладку аппаратных средств, наладку программно-технических средств в комплексе, а также управление технологическим процессом. Всего система включала в себя 34 программы. Система управления прошла стадию опытной эксплуатации в течение нескольких сеансов и обеспечила рабочий сеанс получения жидкого гелия в автоматическом режиме.

Акустический газоанализатор

В процессе разработки системы управления криогенным комплексом УНК встала задача детектирования утечек гелия, так как протяженные коммуникации и огромное количество соединений делали утечки, особенно на этапе наладки, весьма вероятными. Надежного и удобного промышленного прибора не было. Аналогичная задача – детектирование утечек метана в газовой промышленности, в шахтах до сих пор не нашла окончательного экономичного решения. Речь идет, как правило, о детектировании одного сорта газа, отличающегося от воздуха молекулярным весом.

Был разработан датчик утечки с использованием зависимости скорости распространения звука в газе от молекулярного веса. Датчик выполнен в виде акустического высокочастотного полуволнового резонатора. Отверстия в середине образующей цилиндра обеспечивают конвекционное проникновение испытуемого газа в резонатор, не ухудшая его добротности, которая для металла этой геометрии и размеров превышает 200. Достигнута чувствительность по метану и погрешность измерения 0,5% объемного содержания в диапазоне температур -40...+60⁰С. Разработка защищена патентом на изобретение [27].

Выводы

Системы управления стендами исследования СП-магнитов обеспечили наряду с другими средствами возможность для всестороннего исследования процессов, происходящих в магните во всех режимах его работы.

Особое внимание уделено срыву сверхпроводимости и переходу в резистивное состояние. Набор измерительных средств в составе этих систем позволил

разработчикам СП-магнита создать СП-кабель необходимого качества, разработать и создать серию полномасштабных 6-метровых сверхпроводящих магнитов.

Опыт, полученный при создании СУ стендами исследования СП-магнитов, а также унифицированный набор электронной аппаратуры послужили основой для создания систем управления стендами испытания криогенного оборудования в НПО «Криогенмаш» и криогенного комплекса стенда испытания СП-магнитов в ИФВЭ. Полученный опыт используется в настоящее время при автоматизации криогенного комплекса сверхпроводящего сепаратора К-мезонов в ИФВЭ.

В Заключении отмечается, что главным достигнутым итогом диссертационной работы является вклад в обеспечение программы физических исследований на ускорительном комплексе У-70, а также в разработку и исследование оборудования сверхпроводящего ускорительного комплекса ИФВЭ. Полученные при этом основные научные и практические результаты, вошедшие в диссертацию, можно сформулировать следующим образом.

1. Разработан и создан унифицированный набор программно-аппаратных средств управления электрофизическим оборудованием, обеспечивших:
 - магнитные измерения и управление источниками питания магнитных систем;
 - вакуумные измерения и управление вакуумным оборудованием;
 - исследования мишеней с большим удельным энерговыделением;
 - измерения и управление параметрами криогенного оборудования;
 - исследования характеристик сверхпроводящих магнитов.
2. Разработана и создана система управления комплексом каналов выведенных из ускорителя У-70 частиц, обеспечившая наряду с другими мерами выполнение программы физических исследований на пузырьковых камерах «Мирабель» и «Людмила», на установках ФОДС, СВД, Комплекс меченых нейтрино.
3. Разработаны и созданы системы управления стендами исследования и испытания оборудования для ускорительно-накопительного комплекса ИФВЭ (стенды магнитных измерений, стенды исследования сверхпроводящих магнитов, стенд исследования мишеней, стенды испытания криогенного оборудования).
4. Разработана и создана система управления криогенным комплексом стенда испытания сверхпроводящих магнитов ИФВЭ, обеспечено получение жидкого азота и гелия в автоматическом режиме работы оборудования.
5. Изучены и оптимизированы характеристики оборудования (импульсный модулятор, клистрон, импульсный трансформатор), составляющего мощную часть высокочастотного сепаратора для жидководородной пузырьковой камеры «Людмила». Исследованы факторы, влияющие на

ввод высокочастотной мощности в диафрагмированный волновод, разработана методика и приборы, облегчающие ввод, измерена введенная мощность. Эти меры, в частности, позволили обеспечить высокую чистоту сепарированного пучка антипротонов, добиться точности в измерении импульса сепарированных частиц лучше $\pm 0,5\%$. Результаты работ были использованы на линейном ускорителе УФТИ, г. Харьков.

6. Разработан и использован в промышленности унифицированный набор магистрально-модульной аппаратуры для построения систем управления.

Основные результаты опубликованы в работах:

1. В.Н. Алферов, Н.С. Брюханов, П.Б. Ветров, А.М. Вишневская, Н.А. Галяев, А.А. Гусак, В.С. Кузнецов, А.Ф. Лукьянцев, А.Н. Мойбенко, К.И. Османов, Б.В. Просин, Ю.А. Романов, В.Е. Соловьев, Л.Б. Соловьева, Ю.С. Ходырев. Система автоматизированного контроля и управления каналом, формирующим пучки сепарированных частиц для жидководородной пузырьковой камеры «Мирабель». - Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1982.
2. В.Н. Алферов, П.Б. Ветров, Н.А. Галяев, А.А. Гусак, В.С. Кузнецов, А.Ф. Лукьянцев, А.Н. Мойбенко, К.И. Османов, Ю.А. Романов, В.Е. Соловьев, Л.Б. Соловьева, Ю.С. Ходырев. Автоматизированная система для настройки канала сепарированных частиц. Препринт ИФВЭ, 83-160, 1983.
3. V. Alferov, A. Alexandrov, V. Ershov, A. Gussak, V. Kovaltsov, S. Kojhin, A. Kuznetsov, I. Lobov, S. Petrov, E. Sherbakov. PC/Multibus based Control System. Proceed of the 1997 Intern. Conf. on Accelerator and Large Experimental Control Systems. - Beijing, China, 1997, p.207.
4. A. Alexandrov V. Alferov, N. Detinenko, V. Krendeleev, I. Lobov, A. Sytin. Windows 95 Based Real Time Power Supplies Data Acquisition System. Proceed of the PCaPAC 2000 Workshop. - Hamburg, Germany, 2000, <http://www.desy.de.pcapac>.
5. V.N. Alferov, A.I. Ageyev, E.A. Bulatov, V.I. Demyanchuk, A.F. Dunaitsev, E.M. Kashtanov, V.M. Muraviev, K.P. Myznikov, A.P. Orlov, A.N. Shamichev, V.A. Vasiliev, V.V. Sytnik. Test Facility for Full-Scale Superconducting Magnets for UNK. Proceed of 10-th Intern. Cryogenic Conf. - Helsinki, 1984, p. 742-745.
6. В.Н. Алферов, А.Ф. Дунайцев, В.А. Кренделев, А.Ф. Лукьянцев, В.Е. Соловьев, Е.А. Устинов. Средства автоматизации электрофизических и технологических установок сверхпроводящих ускорителей. Всесоюзный симпозиум «Модульные информационно-вычислительные системы – VII». - Новосибирск, 1989, 5-7.
7. В.Н. Алферов, А.В. Абрамов, В.А. Кренделев, В.В. Плотников. Автоматизированная распределенная система управления криогенным гелиевым комплексом на базе микропроцессоров и магистрально-модульной системы СУММА. - В кн.: «Автоматизация и роботизация в химической промышленности» Тезисы доклада на Всесоюзной научной конференции, Тамбов, 1986.

8. В.Н. Алферов, В.Ф. Баянов, А.А. Гусак, Ю.А. Романов, Ю.С. Ходырев. Установка для исследования мишеней, облучаемых протонным пучком высокой плотности. - Препринт ИФВЭ 85-132, 1985.
9. В.Н. Алферов, А.А. Гусак, А.В. Евтихийев, О.Н. Изюмин, В.Г. Кузьменко, А.Ф. Лукьянцев, В.Г. Новиков, Э.В. Осипов, Ю.А. Романов, Е.В. Серга, В.Е. Соловьев, А.В. Харламов, Ю.С. Ходырев, В.Д. Якушев. Система автоматизированного управления и контроля стенда исследования мишеней УНК. - Доклады 4-го Всесоюзного совещания по обработке физической информации, Ереван, 1988, с.95.
10. В.Н. Алферов, Л.А. Ким, В.В. Комаров, В.С. Кузнецов. Последовательная магистраль СУММА в системе управления каналом сепарированных частиц. - Препринт ИФВЭ 83-13, 1983.
11. В.Н. Алферов, П.Б. Ветров, Ю.Н. Вражнов, А.С. Дышкант, В.С. Кузнецов, А.Н. Мойбенко, В.Е. Соловьев. Система автоматизированного контроля и управления режимами магнитооптических элементов канала для установки ФОДС. - Препринт ИФВЭ 84-81, 1984.
12. V.N. Alferov, A.I. Ageyev, K.F. Guertsev, V.I. Gridassov, A.A. Gussak, A.F. Dunaitsev, V.A. Krendelev, A.F. Lukyantsev, V.M. Proshin, V.E. Solovyov, A.N. Sytin, E.A. Ustinov. Magnet Test Facility Control System for Superconducting Magnets of UNK. - Proceed of the 1991 Intern. Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Tsukuba, Japan, 1991, p.171.
13. V. Alferov, A. Ageyev, A. Dunaitsev, Y. Ivanov, A. Khvorostyanov, V. Krendelev, A. Lukyantsev, V. Proshin, A. Sytin. Control System of the IHEP Cryo Complex. Proceedings of the 1997 International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Beijing, China, 1997, p.173.
14. В.Н. Алферов, А.И. Агеев, А.Г. Александров, С.И. Зинченко, Ю.Н. Иванов, А.Г. Квашин, В.А. Кренделев, Ю.А. Лазин, А.Ф. Лукьянцев, В.М. Прошин, Л.Л. Соловьев, А.Н. Сытин, В.Н. Федорченко, В.П. Фомин, А.Г. Хворостянов, В.А. Шиптенко. Система управления криогенным комплексом стенда калибровки сверхпроводящих магнитов. - 14-е Совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1994.
15. Y. Bordanovski, S. Klimov, V. Ilukin, V. Kuznetsov, O. Radin, A. Shalunov, A. Sytin, P. Vetrov, V. Yaryguine, V. Zapolski, V. Zarucheiski. U-70 proton Synchrotron Extracted Beam Lines Control System Modernization. Proceed of the 2001 Intern. Conf. on Accelerator and Large Experiment Control Systems. - Los Angeles, USA, 2001, <http://icalepcs2001.slac.stanford.edu>.
16. В.Н. Алферов, Ю.В. Бордановский, П.Б. Ветров, С.Б. Климов, В.Н. Запольский, В.Г. Заручейский, В.Л. Илюкин, В.С. Кузнецов, А.Ф. Лукьянцев, О.Н. Радин, А.Н. Сытин, А.Н. Шалунов, В.Н. Ярыгин. Модернизация системы управления комплексом каналов выведенных из ускорителя У-70 частиц. - В сб.: XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц. - Протвино, 2000.

17. В.Н. Алферов, А.М. Вишневская, М.Б. Владимирцов, Е.П. Горшков, В.Г. Заручейский, В.И. Котов, В.М. Левин, В.В. Пагирев, Б.В. Просин, В.Л. Смирнов, Р.М. Суляев, С.А. Черный, И.Р. Ямпольский. Высокочастотный сепаратор для пузырьковой жидководородной камеры «Людмила». // ЖТФ, 45, 2169 (1975).
18. В.Н. Алферов, П.В. Ананич, Ю.В. Белов, В.А. Веткин, А.М. Вишневская, Е.П. Горшков, Л.Р. Григолович, А.И. Грызлов, В.М. Ильичев, Е.Б. Иссерлин, И.А. Квашонкин, Г.М. Куперман, А.В. Негурей, В.В. Пагирев, Б.В. Просин, В.М. Робина, С.А. Твеленев, С.Ф. Хатунцев, С.А. Черный, А.П. Шульга, И.Р. Ямпольский. Высокочастотный сепаратор для пузырьковой жидководородной камеры «Людмила». // ЖТФ, 45, 2183 (1975).
19. В.Н. Алферов, И.Р. Ямпольский. Об искажении вершины импульса в импульсном трансформаторе. // ПТЭ, №4, 1976.
20. В.Н. Алферов, Г.А. Ашкинази, Ю.Н. Толмачев, О.К. Тоомла, И.Р. Ямпольский. Исследование возможности применения кремниевых симметричных ограничителей напряжения серии ОНСК для стабилизации плоской части высоковольтных импульсов напряжения. // Электронные приборы, выпуск «Преобразовательная техника», 1971.
21. В.Н. Алферов, И.Р. Ямпольский. Устройство для стабилизации напряжения заряда накопительного конденсатора. Авторское свидетельство № 589685, кл. G 05 F1/56 от 23.04.1983 SU №1013927.
22. В.Н. Алферов, И.Р. Ямпольский. Управляемый разрядник для защиты мощных сверхвысокочастотных устройств. // ПТЭ, №4, 1973.
23. В.Н. Алферов, И.Р. Ямпольский. Схема защиты волноводных трактов с использованием СВЧ-модулятора на переключающих диодах. // Вопросы атомной науки и техники, Серия «Линейные ускорители», вып. 1 (11), 1976.
24. В.Н. Алферов, К.А. Моисеев, Г.П. Щелкунов, И.Р. Ямпольский. Способ тренировки мощных клистронов при положительной полярности напряжения на катоде. Электронная техника, серия I, Электроника СВЧ, вып. 1, 1970.
25. В.Н. Алферов. Цифровое измерение импульсной высокочастотной мощности. // ПТЭ, №2, 1975.
26. V. Alferov, A. Vaguine. Commercial applications of large accelerator control system products. - Proceed. of the 1995 Intern. Conf. On Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, Chicago, USA, 1995, p. 464.
27. В.Н. Алферов, В.А. Кренделев, В.А. Ключников. Акустический газоанализатор. Патент на изобретение № 2142131 от 27.11.1999.

Рукопись поступила 18 февраля 2003 г.

В.Н. Алферов.

Создание комплекса унифицированных средств управления электрофизическим оборудованием и применение их на каналах частиц и стендах ИФВЭ.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы *Word*.

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 19.3.2003. Формат 60x84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 2,41. Уч.-изд.л. 2,73. Тираж 100. Заказ 26. Индекс 3649.
ЛР №020498 06.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142280, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

АВТОРЕФЕРАТ, 2003 –6, ИФВЭ, 2003
