

*На правах рукописи*

ХИЛЬЧЕНКО Александр Дмитриевич

АППАРАТНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ  
ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК ИЯФ СО РАН

01.04.01- приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

НОВОСИБИРСК - 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

#### ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| ВОСТРЕЦОВ<br>Алексей Геннадьевич    | – доктор технических наук, профессор,<br>Новосибирский государственный<br>технический университет, г. Новосибирск.   |
| КРАСИЛЬНИКОВ<br>Анатолий Витальевич | – доктор физико-математических наук,<br>РНЦ “Курчатовский Институт”,<br>г. Москва.   |
| КУПЕР<br>Эдуард Адольфович          | – доктор технических наук,<br>Учреждение Российской академии наук<br>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера<br>Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск. |
| ВЕДУЩАЯ<br>ОРГАНИЗАЦИЯ:             | – Учреждение Российской академии наук<br>Физико-технический институт<br>имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург.  |

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.01 Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск,  
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физ.-мат. наук

А. В. Бурдаков

# ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

Наблюдаемый в последние десятилетия прогресс в области экспериментальных исследований по физике плазмы и УТС связан не только с прорывом в понимании физических процессов, определяющих возможность создания, нагрева и удержания высокотемпературной плазмы в системах с различной конфигурацией магнитного поля, но и с рядом важных достижений технического и технологического плана. К их числу можно отнести появление новых конструкционных материалов, сверхпроводящих магнитов с большой напряженностью магнитного поля, разработку мощных источников ВЧ и СВЧ излучения, нагревных инжекторов атомарных пучков, нового диагностического оборудования, а также создание полномасштабных автоматизированных управляющих и измерительных систем. На современных установках такие системы берут на себя решение задач управления технологическим оборудованием и контроля его состояния, используются для поддержания параметров плазмы и подавления МГД и кинетических неустойчивостей плазменного шнура, поддерживают работу диагностического комплекса. С их помощью проводится сбор, обработка, архивирование и отображение экспериментальных данных, решаются задачи по численному моделированию протекающих в плазме процессов и сравнительному анализу полученных результатов с данными эксперимента.

## Цель работы

Формирование принципов построения, разработка архитектуры, аппаратной и программной инфраструктуры информационно-измерительных и управляющих систем, ориентированных на поддержку экспериментальных исследований в области физики высокотемпературной плазмы и УТС. Создание систем регистрации, сбора, и обработки экспериментальных данных, систем управления технологическим и диагностическим оборудованием для исследовательских комплексов ИЯФ СО РАН: ГОЛ-1, ГОЛ-М, У-1 и СПИН, У-2, У-3, ГОЛ-3, ГОЛ-3М, Амбал-М и ГДЛ.

## Научная новизна работы. Результаты, выносимые на защиту

- Предложен и апробирован в плазменном эксперименте метод регистрации экспериментальных данных, основанный на цифровой осциллографии. В рамках реализации этого метода:

- сформулированы принципы построения аппаратуры регистрации импульсных сигналов на основе быстродействующих АЦП;
  - предложены схмотехнические решения, направленные на построение таких АЦП на электронной элементной базе низкой и средней степени интеграции;
  - создан первый в стране комплект широкополосных регистраторов формы однократных импульсных сигналов, ориентированных на поддержку основных диагностик плазмы;
  - сформирован функционально полный набор методик для настройки и метрологической поверки аппаратуры регистрации, созданы автоматизированные стенды;
  - на основе однокристалльных ИС АЦП и оригинальных быстродействующих устройств выборки и хранения (УВХ) разработан функционально полный комплект аппаратуры регистрации формы импульсных сигналов в стандарте КАМАК, организовано ее мелкосерийное и промышленное производство.
- На установках ГОЛ-1 и ГОЛ-М созданы первые в стране автоматизированные информационно-измерительные системы с централизованным управлением, ориентированные на поддержку исследований по физике плазмы и УТС.
  - Предложена и апробирована в реальном эксперименте методика построения распределенных подсистем управления технологическим оборудованием плазменных установок. В рамках ее реализации разработан унифицированный комплект периферийных контроллеров с управляющим ядром на основе микропрограммного управляющего автомата, микро-ЭВМ и микроконтроллеров.
  - Созданы первые полномасштабные системы автоматизации плазменного эксперимента на основе многомашинных управляющих комплексов (установки ГОЛ-М, У-1 и Спин).
  - Разработаны принципы построения, структура, аппаратная и программная инфраструктура комплексов с распределенным управлением на основе машин серий СМ и Электроника, архитектуры КАМАК, интеллектуальных крейт-контроллеров и каналов связи MIL-STD-1553В. На этой основе на установках ГОЛ-3 и Амбал-М созданы первые системы автоматизации исследований по физике плазмы и УТС, функционирующие в режиме реального времени.

- Сформулированы принципы построения, разработаны аппаратная и программная инфраструктура:
  - многоканальных синхронных систем регистрации экспериментальных данных и измерительных кластеров;
  - систем сбора данных на основе гальванически изолированных и встраиваемых регистраторов;
  - систем регистрации со встроенными элементами потоковой математической обработки экспериментальных данных.
- На установках ГОЛ-3М, Амбал-М и ГДЛ на основе машин класса x86, каналов связи Ethernet-10/100, многоканальных систем регистрации и сбора данных последнего поколения, специализированных контроллеров и контроллеров общего назначения созданы полномасштабные информационно-измерительные и управляющие комплексы, обеспечивающие проведение исследований по всей их физической программе.

### **Научная и практическая ценность работы**

Создание аппаратуры регистрации формы импульсных сигналов, непосредственно взаимодействующей с вычислительной техникой, коренным образом изменило характер проведения исследований на импульсных электрофизических установках. Ее применение в плазменном эксперименте позволило в полном объеме реализовать потенциал диагностического комплекса установок, устранило характерный для аналоговой осциллографии и фотографического метода фиксации осциллограмм разрыв во времени между этапами набора и анализа экспериментальных данных. Регистраторы в конструктивах КАМАК, многоканальные синхронные системы регистрации, измерительные кластеры, системы сбора данных на базе гальванически изолированных регистраторов и системы регистрации со встроенными элементами первичной обработки информации стали основой измерительных комплексов установок ИЯФ СО РАН ГОЛ-1, ГОЛ-М, У-1, У-2, У-3, ГОЛ-3, Амбал-М и ГДЛ. Они используются для регистрации параметров плазмы на токамаках Глобус-М в ФТИ им. Иоффе РАН, Т10 и Т11 в РНЦ КИ и ТРИНИТИ, ТЕХТОР в Германии, на стелараторе LHD в Японии, на стелараторе Л5 в ИОФАН. Разработка регистраторов серии Ц91ХХ и многоканальных систем сбора данных, формирование набора методик и создание стендов для их настройки и метрологической поверки предоставили базу для серийного производства в стране приборов этого класса. Созданная в процессе разработки систем автоматизации плазменного эксперимента аппаратура управления и контроля, способная корректно выполнять свои

функции в тяжелых условиях эксплуатации, используется на комплексах ВИТА, БНЗТ и других исследовательских стендах ИЯФ СО РАН.

Разработка принципов построения, аппаратной и программной инфраструктуры систем автоматизации с распределенным управлением на основе интеллектуальных контроллеров и сетевых архитектур MIL-STD-1553B и Ethernet позволила создать на установках Амбал-М, ГОЛ-3М и ГДЛ автоматизированные измерительные и управляющие комплексы, функционирующие в режиме, близком к режиму реального времени. Опыт их создания был использован на многих термоядерных установках СССР и России.

### **Апробация диссертации**

Результаты работы представлялись на семинарах ИЯФ СО РАН, ФТИ им. Иоффе РАН, РИЦ КИ, ГИЦ РФ ТРИНИТИ, докладывались на Всесоюзных и Всероссийских семинарах, на Европейских и Международных конференциях, публиковались в виде препринтов и статей в реферируемых журналах. Общее количество сообщений и публикаций по теме диссертации – 114.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, содержит 235 страниц, 100 рисунков и одну таблицу, список цитируемой литературы из 134 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведена краткая характеристика плазменных установок ИЯФ СО РАН, дан анализ направлений развития аппаратных компонент их управляющих и измерительных систем.

**В первой главе** приведен обзор исследований и разработок, направленных на создание систем автоматизации плазменного эксперимента, решающих задачи:

- управления технологическим оборудованием установок и контроля его текущего состояния;
- многоканальной регистрации формы импульсных сигналов, формируемых датчиками диагностического комплекса;
- сбора и обработки экспериментальных данных, их отображения в удобном для анализа виде и архивирования.

Первая фаза этих работ (§1.1) была посвящена созданию аппаратуры регистрации. В ее рамках, на основе сопоставления различных методов оцифровки моноимпульсных сигналов, был выбран вариант построения регистраторов на основе быстродействующих АЦП и буферных запоминающих устройств (ЗУ). В 1975 г. был разработан 8-разрядный конвейерный АЦП с частотой дискретизации 20МГц, ставший основой первого в стране 8-канального цифрового регистратора формы импульсных сигналов (§1.2). Положительные результаты работы этого прибора в диагностике плотности плазмы установки ГОЛ-1 инициировали создание регистраторов семейства Импульс, но уже в виде модулей перспективного для построения многоканальных измерительных систем стандарта КАМАК. Эти приборы имели рекордное быстродействие (100 МГц, 6 – 7 бит). Они строились на основе АЦП, использующих технологию аналоговой свертки входных сигналов, оригинальные компараторы зоны и узлы цифровой коррекции ошибок преобразования. При разработке этих приборов были апробированы методика программной адаптации их режимов работы, амплитудных и временных шкал к параметрам сигналов и режимам работы различных диагностик, метод импульсного питания электронных узлов с высоким токопотреблением. В 1977 году, с использованием ЭВМ Одра-1325, последовательной системы связи, контроллеров крейта КАМАК и регистраторов первого поколения, на установке ГОЛ-1 была создана первая в стране информационно-измерительная система (ИИС), ориентированная на поддержку исследований по взаимодействию РЭП с плазмой (§1.3). С ее помощью фиксировались, обрабатывались, архивировались и отображались в удобном для анализа виде сигналы диамагнитной и рентгеновской диагностик, диагностик температуры и плотности электронной компоненты плазмы, энергии РЭП на входе и выходе магнитной ловушки. Эта ИИС, благодаря непосредственному взаимодействию измерительной аппаратуры с вычислительной техникой и развитости сервисных функций прикладного программного обеспечения (ПО), коренным образом изменила технологию проведения исследований по физике плазмы и УТС. Снизив до минимума временные издержки и трудозатраты на этапах регистрации, сбора и обработки данных, она позволила в полном объеме реализовать потенциал диагностического комплекса. Позитивные результаты ее работы создали предпосылки для разработки и организации серийного производства регистраторов, обладающих улучшенными метрологическими характеристиками и расширенными функциональными возможностями. В период с 1980 по 1985 гг. на основе однокристалльных АЦП и оригинальных УВХ была разработана линейка приборов серии Ц91XX с частотами дискретизации

АЦП до 50 МГц, созданы модули синхронизации и коммутаторов аналоговых сигналов, буферных ЗУ (§1.4). Параллельно отрабатывались методики и создавались стенды для поверки этой аппаратуры и метрологического контроля ее характеристик (§1.5). В 1986 г. эти наработки были переданы Чебоксарскому ПО “Электроприбор”, которым было организовано серийное производство регистраторов семейства Ф4224/4225/4226 (аналоги приборов серии Ц91ХХ) и многоканальных систем сбора данных ФК 4224/4225/4226, ставших ключевыми элементами ИИС многих импульсных электрофизических установок страны. В ИЯФ СО РАН эта аппаратура и новое поколение регистраторов серий АЦП1632 и АС824А/Б/В, стали основой ИИС установок ГОЛ-М, У-1 и Спин, ГОЛ-3, ГДЛ и Амбал-М.

Параллельно с аппаратурой регистрации в ИЯФ СО РАН разрабатывались системы управления технологическим оборудованием плазменных установок, выполняющие свои функции в режиме, близком к режиму реального времени (§1.6). Построить такие системы удалось за счет переноса с уровня ЭВМ на аппаратный уровень операций по сбору контрольной информации и формированию управляющих воздействий. С этой целью были разработаны периферийные контроллеры, включающие в свой состав интерфейсный узел к системе связи, управляющий автомат, ЗУ опорных констант и данных, а также узел формирования и обработки выходных/входных сигналов, строящийся на основе многоканальных ЦАП и АЦП и портов дискретного ввода/вывода. Эти контроллеры посредством ЦАП формировали управляющие воздействия, пропорциональные предварительно загруженным в их ЗУ кодам, а с помощью АЦП измеряли текущие значения амплитуды сигналов в контрольных точках. Между контроллером и исполнительным устройством включались специализированные узлы, замыкающие контур обратной связи в локальных подсистемах управления. Применение этих приборов позволило устранить влияние на динамические характеристики контуров управления ограничений, связанных с вычислительной техникой и системой связи. С их помощью на установках ГОЛ-1, ГОЛ-М, У-1, ГОЛ-3, ГОЛ-3М стабилизировались коэффициенты передачи измерительных трактов, перестраивались напряжения питания ФЭУ и оптические длины интерферометров, заряжались емкостные накопители энергии, контролировались вакуумные условия, формировались синхроимпульсы, задающие временную диаграмму работы оборудования. Следующий шаг в развитии систем управления был сделан в 1984-1985 годах в процессе создания управляющих комплексов установок ГОЛ-М, У-1 и Спин (§1.7). Эти системы уже имели многомашинную архитектуру. Они включали в свой состав периферийные контроллеры на

базе микро-ЭВМ Электроника-60 и аппаратуры КАМАК. Первое поколение многомашинных комплексов еще не имело полноценных средств поддержки процедур удаленного межзадачного взаимодействия, синхронизирующих работу прикладных программ контроллеров. Связанные с этим проблемы были устранены после замены микро-ЭВМ на машины МС1212, обладавшие большой вычислительной мощностью и способностью работать под управлением ОС РВ RSX-11М, а также применения для поддержки процедур межзадачного взаимодействия и синхронизации прикладных процессов ПО “Алиса”. С этими компонентами комплексы приобрели приемлемую для установок масштаба ГОЛ-М, У-1 и Спин, динамику.

**Во второй главе** обсуждаются аппаратные и программные компоненты систем автоматизации следующего поколения. Основные усилия при их создании концентрировались на разработке:

- системы связи с высокой пропускной способностью и помехоустойчивостью, детерминированным методом передачи сообщений и эффективным механизмом доступа абонентов к сетевым ресурсам;
- контроллера крейта КАМАК, интегрирующего в своем составе микро-ЭВМ и унифицированный сетевой интерфейс;
- основанного на клиент-серверной технологии механизма межзадачного взаимодействия и синхронизации прикладных процессов для среды RSX-11М, ОС РВ для крейт-контроллеров, комплекта драйверов для новых сетевых интерфейсов, вспомогательных утилит.

Архитектура этих систем двухуровневая. Функции их базовых элементов выполняют периферийные узлы, отвечающие за корректную работу технологических подсистем установок (§2.1). Каждый такой узел содержит машину МС1212, подчиненные новым контроллерам крейты КАМАК с аппаратурой, объединяющий их канал связи нижнего уровня иерархии, построенный в соответствии с рекомендациями стандарта MIL-STD-1553В. Канал верхнего уровня объединяет все узлы с помощью шлюзов в единую управляющую структуру. Роль сетевых интерфейсов в системе выполняют контроллеры мультиплексных каналов связи, станции абонентов этих каналов и межканальные шлюзы. Для повышения производительности сети и снижения нагрузки на процессоры крейт-контроллеров и узловых машин, при разработке станции был использован подход, основанный на аппаратной реализации ее логическим ядром операций канального и физического уровня. Он же был применен при разработке контроллера канала связи и шлюза,

содержащих встроенную микро-ЭВМ, отвечающую за протокольный слой задач. При создании этой микро-ЭВМ определяющим был тезис совместимости ее процессора по системе команд с процессорами узловых машин (М6/М8), позволяющий сохранить среду разработки прикладного ПО и уже существующие пакеты прикладных подпрограмм. Крейт-контроллер интегрирует в своем составе станцию канала связи, микро-ЭВМ и контроллер магистрали крейта типа К16П. Его контроллер магистрали сопрягается через шину Q-bus со встроенной микро-ЭВМ и обладает способностью поддерживать обращения к модулям КАМАК с частотой до 500кГц в многозадачном режиме работы ее процессора, что важно для клиент-серверных приложений. В связи с тяжелыми условиями эксплуатации приборного парка на плазменных установках, данный набор аппаратных средств был дополнен экран-боксами для размещения крейтов КАМАК, согласующими и развязывающими трансформаторами, предназначенными для гальванической изоляции крейтов на уровне каналов связи и цепей питания. В результате была создана аппаратная основа систем, раскрыть потенциал которых позволили:

- многозадачная ОС PB RSX11-M узловых машин и ее функциональный аналог SM2, созданный для крейт-контроллеров;
- драйвер станции и задачи-драйверы контроллера канала связи и межканального шлюза;
- утилиты конфигурирования сети и загрузки прикладного ПО в крейт-контроллеры из узловых машин;
- система вызова удаленных процедур RCS;
- проблемно ориентированные пакеты подпрограмм: VID1, GRAF, CDR и САМАК;
- стандартные для машин серий CM, MC и Электроника средства редактирования, отладки, сборки и компиляции прикладных задач, создаваемых с использованием ассемблера и фортран.

При создании ОС PB SM2 основное внимание уделялось сокращению до минимума объема кода (до 8Кб) и временных затрат на выполнение процедур по обработке запросов от прикладных задач и взаимодействию с RCS и драйвером станции. Этот драйвер обслуживает запросы логического ядра станции и RCS, согласует форматы командного и информационного обмена по каналам связи. Драйвер шлюза интегрирует компоненты драйвера станции и элементы, обеспечивающие его “прозрачность” во всех конфликтных ситуациях. Задача-драйвер контроллера канала связи выявляет и исправляет

возможные ошибки информационного и командного обмена, локализует их источники. Логика ее работы основана на циклической проверке состояния абонентов, выявлении их запросов и оптимальном распределении между ними сетевых ресурсов за счет организации мультиплексного режима передачи сообщений в канале связи. Важным компонентом этой задачи является маршрутизатор сообщений, ответственный за глобальную и местную адресацию абонентов. Местная адресация базируется на физических адресах абонентов и используется в каналах связи нижнего уровня. Глобальная адресация оперирует с символьными именами абонентов и распространяется на всю сеть. Взаимосвязь символьных и физических адресов задается таблицей конфигурации, формируемой конфигуратором сетевых ресурсов. При инициализации сети эта таблица загружается с дисков узловых машин в контроллеры каналов связи, шлюзы и периферийные контроллеры и используется их драйверами в качестве средства идентификации абонентов. На этом же этапе в крейт-контроллеры загружаются прикладные программы, совмещенные в одном образе с ОС SM2, драйвером станции и RCS. Решают эту задачу начальный загрузчик микро-ЭВМ и утилита удаленной загрузки прикладного ПО, исполняемая произвольной узловой машиной. Взаимная синхронизация работы прикладных кодов, распределенных по крейт-контроллерам и узловым машинам, производится с помощью RCS. Способность последней обеспечивать связь задачи-клиента с параметрами массива данных задачи-сервера, вложенность и многозадачность формируемых ею процедур вызова, - ключевые для рассматриваемых систем. При этом под вложенностью подразумевается возможность вызова из уже вызванной программы любого количества других программ. А под многозадачностью, - возможность вызова из произвольной задачи любого абонента множества удаленных процессов, параллельно исполняемых другими абонентами сети. При этом каждая задача-клиент способна контролировать состояние вызванных ею процедур.

В §2.4 рассматривается система управления импульсным источником питания магнитной ловушки комплекса ГОЛ-3М. Этот источник содержит емкостной накопитель с энергозапасом свыше 20 МДж. Система управления включает в себя инвертор мощностью 150 кВт, регулируемые приемники тока, высоковольтные трансформаторы и выпрямители, цепи блокировки/сигнализации и набор аппаратуры в крейтах КАМАК. Пульт оператора содержит консольный терминал, крейт КАМАК с центральным крейт-контроллером и средствами отображения информации о текущем состоянии элементов источника. Периферийные крейты размещены в отсеках с

емкостными накопителями. Они оснащены комплектом аппаратуры, обеспечивающим контроль состояния блокировок и защит, управление работой приемников тока, измерение напряжений на секциях накопителя во время их зарядки и фиксацию формы разрядных токов. Эта же аппаратура формирует временную диаграмму работы секций и импульсы запуска тиристорных ключей, подключающих их к нагрузке. В центральном крейте располагается контроллер канала связи, объединяющего узловую машину и крейт-контроллеры центрального и периферийных крейтов. Необходимые для корректного решения задач управления и контроля динамические характеристики системы получены за счет оптимального распределения прикладных программ по ее абонентам и применения для организации их взаимодействия системы вызова удаленных процедур RCS.

Система установки Амбал-М (§2.5) содержит два фрагмента: управляющий и диагностический. Крейт-контроллеры каждого из них объединяются собственным каналом связи и работают под контролем узловых машин МС1212, размещенных в пультовой. Эти машины оснащены станциями сопряжения с каналами связи и интерфейсом DEQUA, связывающим их с файловым сервером по протоколу DECNET. Файловый сервер используется для хранения массивов данных, накапливаемых во время рабочего импульса установки. Все данные, находящиеся на сервере, доступны по сети NETWARE для машин, использующихся персоналом установки для обработки экспериментальных данных. Информация, поступающая во время рабочего импульса Амбал-М с управляющего и диагностического фрагментов системы, выводится в виде осциллограмм, текста и гистограмм на цветные растровые мониторы с помощью графических серверов, построенных на базе крейтов КАМАК. Два десятка периферийных крейтов с аппаратурой распределены по экспериментальной площадке и размещены в экран-боксах. Работа каждого из фрагментов системы Амбал-М основана на диалоговом режиме взаимодействия оператора с программным обеспечением узловых машин и применении клиент-серверной технологии для организации взаимодействия прикладных программ. Последние распределены по крейт-контроллерам и узловым машинам. Как и на ГОЛ-3М, роль клиента в системе Амбал-М выполняют задачи, исполняемые узловыми машинами, а серверов – программы контроллеров периферийных крейтов.

**В третьей главе** обсуждаются принципы построения синхронных систем регистрации данных и измерительных кластеров, ориентированных на фиксацию сигналов многоканальных диагностик и решение задач, связанных с восстановлением временной динамики пространственных распределений

параметров плазмы. В таких приложениях определяющей является способность измерительных трактов одновременно и с малой погрешностью фиксировать текущие амплитудные значения входных сигналов, исключая процедуры интерполяционной обработки, масштабирования и совмещения временных координат результирующих информационных массивов. Впервые потребность в таких системах возникла на установке ГОЛ-1 (§3.1) при попытке восстановления по сигналам датчиков, распределенных вдоль магнитной ловушки, характера поведения во времени продольных распределений диамагнетизма плазмы и интенсивности ее рентгеновского излучения. Для фиксации этих сигналов использовались регистраторы Импульс-А, формирующие результаты измерений под контролем собственных генераторов опорных синхроимпульсов. Естественный разброс частоты эти генераторов предопределял различие временных шкал регистраторов, что осложняло процедуры анализа поставляемых ими данных. Исправить ситуацию помогло включение в состав измерительного кластера, интегрирующего многоканальные системы регистрации обеих диагностик, подсистемы синхронизации, формирующей с помощью общего задающего генератора опорные синхроимпульсы для всех измерительных трактов. Это решение широко применялось при построении синхронных измерительных систем и кластеров на базе одно и многоканальных регистраторов в конструктивах КАМАК. Оно же использовалось и в системах сбора данных ФК4224/ФК4225/4226, выпуск которых был освоен Чебоксарским ПО “Электроприбор”. Недостатки многоканальных систем и кластеров первого поколения определялись малой разрядностью (6–10 бит) и относительно узкой полосой пропускания (0–15 МГц) регистраторов. Не отличалась особой надежностью и подсистема синхронизации, содержащая большое число кабельных трасс и разъемных соединений. Устранить эти недостатки удалось в новых системах за счет переноса на межмодульную магистраль всех шин синхронизации и уменьшения до минимума приведенной к входам АЦП их измерительных трактов апертурной неопределенности опорных синхроимпульсов. Последняя задача решалась с помощью узлов “очистки” синхроимпульсов от избыточных фазовых шумов, строящихся на основе управляемых напряжением генераторов (ГУН) с петлей фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Апертурная неопределенность выходного сигнала такого узла снижается до уровня единиц пикосекунд, что позволяет существенно расширить как полосу рабочих частот регистраторов, так и их амплитудный динамический диапазон. Модули регистрации новых систем – многоканальные (§3.2). Они строятся на основе 12-разрядных АЦП. Базовым

элементом цифрового узла этих модулей является программируемая логическая матрица (FPGA). С целью охвата новыми системами широкого спектра диагностик было разработано несколько типовых модулей регистрации: 4-канальные ADC1250/32 и ADC1250/32М с максимальным значением частоты дискретизации 50МГц и две модификации (с входными фильтрами и без них) 8-канальных регистраторов ADC1204 с частотой дискретизации АЦП до 4 МГц. Измерительные тракты этих приборов содержат входные масштабирующие усилители с программно изменяемым коэффициентом передачи и ЦАП смещения положения нуля шкалы преобразования по амплитуде. Их АЦП работают под контролем синхросигналов, формируемых модулем контроллера с привязкой по фазе и частоте к сигналу опорного генератора, либо к внешнему синхросигналу, поступающему от таймера/генератора кластера. Этим, а также включением в состав межмодульной магистрали радиальных линий передачи синхроимпульсов, обеспечивается синхронный режим работы измерительных трактов, количество которых в системе может варьироваться от 16 до 128. Контроллер этих систем на основе процессора ARM7TDI позволяет:

- использовать на уровне интерфейса каналы связи Ethernet-10/100, протоколы TCP/IP и UDP/IP и стандартные драйверы;
- реализовать процедуры поверки регистраторов по внешним командам и при включении источников питания;
- поддерживать процедуры удаленной загрузки конфигурационных файлов в FPGA регистраторов и опорных констант в регистры, задающие режим работы и параметры измерительных трактов;
- реализовать операции предварительной обработки массивов данных по алгоритмам, загружаемым через канал связи.

На заключительной фазе работ магистрально-модульная архитектура синхронных систем была заменена на модульную, использующую радиальные линии связи типа SATA для передачи синхроимпульсов от модуля синхронизатора к регистраторам и встроенные в синхронизатор и регистраторы контроллеры канала связи Ethernet-100. Эти изменения, наряду с применением специализированных ИС для построения узлов очистки опорных синхросигналов, позволили снизить приведенную к входам АЦП апертурную неопределенность синхроимпульсов до уровня 1 пс. Базовыми для систем и кластеров последнего поколения стали две модели регистраторов: 8-ми и 2-канальная на основе 12-разрядных АЦП с максимальным значением частоты дискретизации в 50 и 500 МГц. Их измерительные тракты содержат традиционные элементы: входные

усилители с программно изменяемым коэффициентом передачи и ЦАП смещения положения нулевой линии входного сигнала. Цифровой узел и контроллер канала связи Ethernet этих приборов построены на основе FPGA. Унификация интерфейсного узла модулей системы позволила реализовать мультиплексный режим их взаимодействия с сервером через коммутатор с результирующим трафиком информационного и командного обмена 80 – 100 Мбайт/с. Модуль синхронизатора, используя собственный опорный генератор или синхросигнал таймера/генератора, формирует для регистраторов жестко фазированные синхроимпульсы, задающие частоту дискретизации их АЦП. Он также принимает и привязывает по фазе к этим синхроимпульсам внешний импульс запуска, размножает его и передает регистраторам. Таймер/генератор выполняет функции ведущего модуля подсистемы синхронизации кластера. Он формирует опорные синхроимпульсы и импульсы запуска для подчиненных ему систем. Передаются эти сигналы к синхронизаторам по оптоволоконным линиям связи. Примером кластера может служить измерительный комплекс диагностики температуры и плотности электронной компоненты плазмы методом томсоновского рассеяния (§3.4). Функции источника зондирующего излучения в ней выполняет неодимовый лазер с длительностью импульса в 15 нс. Определяющая особенность диагностики связана с фиксацией в большом количестве спектральных интервалов формы сигналов малой длительности и интенсивности. Эти сигналы преобразуются в электрическую форму фотоприемниками на основе лавинных фотодиодов С30659Е-1060. Фиксируются они с частотой дискретизации 500 МГц регистраторами на основе 12-разрядных АЦП по синхроимпульсам, формируемым таймером/генератором и синхронизаторами. В страничной моде работы регистраторов и многоимпульсном методе зондирования кластер фиксирует временную динамику пространственных распределений температуры/плотности плазмы.

**В четвертой главе** рассматриваются системы регистрации со встроенными элементами обработки данных, выполняющие функции “интеллектуальных” датчиков, поставляющих информацию о текущих значениях параметров плазмы в режиме реального времени.

В системе регистрации плотности плазмы 8-канального гетеродинного интерферометра (§4.1) используется метод детектирования, основанный на прецизионном измерении длительности периода фазомодулированного плазмой сигнала несущей и сигнала опорного канала и формировании текущих значений набега фазы в виде их разности. Система содержит девять идентичных измерительных трактов. Каждый тракт содержит полосовой

фильтр, подавляющий шумовые компоненты сигнала, усилитель-ограничитель и АЦП. Блок обработки отсчетов тракта фиксирует только те из них, которые соответствуют точкам, предшествующей переходу входного сигнала через ноль и следующей за ней. В предшествующей точке, одновременно с отсчетом АЦП, в буферном регистре фиксируется текущее содержимое счетчика, подсчитывающего количество периодов частоты дискретизации АЦП. Блок обработки вычисляет длительность интервала, лежащего между этой и истинной точкой пересечения сигналом нулевой линии, добавляет полученное значение в виде дробного остатка к содержимому регистра. Результат этой операции записывается в FIFO. Величины набега фазы формируются в виде разности временных координат точек перехода через ноль входных сигналов и сигнала опорного тракта, взятых с одним и тем же индексом. Результаты измерений, одновременно с их записью в SDRAM для последующей передачи серверу диагностики, преобразуются в аналоговую форму ЦАП и могут использоваться в контурах стабилизации плотности плазмы или контроля положения плазменного шнура в магнитной ловушке. Система обладает полосой пропускания измерительных трактов в 300 кГц при частоте несущей 1 МГц, диапазоном измерения набега фаз более 500 радиан при разрешении  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  радиан.

В §4.2 обсуждается измерительный комплекс дисперсионного интерферометра (ДИ) на основе  $\text{CO}_2$  лазера, не чувствительного к вибрациям элементов оптического тракта. В этом ДИ используется искусственная фазовая модуляция излучения одного из зондирующих лучей синусоидальным сигналом. При глубине модуляции  $k = \pi$  выходной сигнал ДИ  $I \sim \sqrt{I_1 I_2} \sin(k \sin 2\pi F_m t + \Delta\varphi)$  изменяется от максимума до минимума независимо от набега фазы в плазме  $\Delta\varphi$ . Величина же  $\Delta\varphi$  в зоне максимальной чувствительности ДИ пропорциональна текущему значению амплитуды модулирующего сигнала. Измерительный комплекс многоканального ДИ с данным методом выделения  $\Delta\varphi$  строится на основе одноканальных измерительных модулей (ИМ), блока синхронизации/запуска и 16-канального коммутатора, поддерживающего взаимодействие ИМ с сервером по каналам Ethernet. Синхронизатор формирует временную шкалу ИМ:

- оцифровывающих с  $F_d = 64$  МГц текущие значения амплитуды сигналов фотоприемников и модулятора 14-разрядными АЦП;
- подавляющих паразитные компоненты сигналов фотоприемников и модулятора с помощью цифровых рекурсивных фильтров;
- корректирующих положение нуля этих сигналов, нормирующих их

амплитуды, выделяющих из потоков данных АЦП информативные отсчеты, вычисляющих по ним текущие значения  $\Delta\varphi$ ;

– передающих полученные результаты измерений:

а. по каналу связи Ethernet-100, – серверу диагностики;

б. по оптоволоконной линии, – модулю удаленного ЦАП, формирующему сигнал обратной связи для контуров управления плотностью плазмы, формой или положением плазменного шнура.

Встроенные в ИМ узлы автоматической подстройки коэффициента передачи приемного тракта сигнала фотоприемника и стабилизации глубины модуляции зондирующего излучения устраняют влияние на результаты измерений вариаций коэффициентов пропускания/отражения элементов оптического тракта ДИ и интенсивности излучения лазера. ИМ с дискретностью 4 мкс формирует результаты измерения линейной плотности плазмы в диапазоне ее изменения от  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  до  $10^{18} \text{ см}^{-2}$  при скоростях нарастания/спада до  $10^{18} \text{ см}^{-2}/\text{с}$ .

В §4.3 обсуждаются принципы построения регистратора энергетического спектра потока  $\gamma$ - квантов для сцинтилляционных детекторов на базе кристаллов BGO, NaI(Tl), CsI, с эффективной скоростью набора статистики до  $3 \cdot 10^6$  событий/с. В приборе сигнал детектора оцифровывается 14-разрядным АЦП с частотой дискретизации 64 МГц и преобразуется формирующим цифровым фильтром в короткий сигнал гауссовой формы с амплитудой, пропорциональной энергии кванта. Эта операция выполняется с помощью процедуры дискретной свертки на элементах FPGA. Размещенный в матрице узел амплитудного анализа формирует в автоинкрементном ЗУ распределение, связывающее энергию и количество попавших в апертуру детектора квантов. Содержащиеся в этом ЗУ данные периодически считываются и передаются серверу диагностики по каналу Ethernet-100. В регистраторе, для повышения скорости набора статистики и стабилизации энергетической шкалы, диоды ФЭУ с большим токопотреблением запитаны от вспомогательного источника, а в состав тракта обработки данных включен узел коррекции амплитудных значений сигнала детектора, устраняющий зависимость интенсивности вспышки от температуры сцинтиллятора. Контроллер канала связи Ethernet-100 поддерживает процедуры информационного и командного обмена с удаленной консолью оператора. С его помощью реализуется доступ к ЗУ, содержащему сформированный на заданном оператором временном интервале энергетический спектр  $\gamma$ -квантов, а также к ЗУ опорных констант и регистрам управления. Последняя опция позволяет программными средствами адаптировать характеристики узла обработки данных к конкретному типу сцинтиллятора.

В §4.4 рассматриваются измерительный и управляющий комплексы масс и энерго анализатора нейтральных атомов, которые:

- формируют программно перестраиваемые потенциалы и токи элементов дисперсионной системы, термоионного источника и других вспомогательных устройств;
- измеряют текущие значения токов и напряжений источников питания, контролируют напряженность магнитного поля в сепараторе частиц, текущие вакуумные условия в камере перезарядки;
- формируют результаты измерений в виде распределений, связывающих между собой количество атомов, их массу и энергию;
- передают эти результаты в удаленный консольный компьютер по каналу связи Ethernet-100 для их отображения и записи в архив.

Измерительный комплекс фиксирует временную динамику интенсивности потоков импульсов, формируемых 24-канальным детектором на основе каналотронов типа СЕМ KBL. Он в каждом сигнальном тракте в последовательности следующих друг за другом временных окон подсчитывается число событий, следующих с частотой повторения до 10МГц. Результаты фиксируются в ЗУ по адресу, содержащему указатель номера текущего окна и номер канала регистрации. Как следствие в последовательности временных окон, “настроенных” на фиксацию атомов с определенной массой и энергией, фиксируется временная динамика интенсивности их потока. Длительность и количество временных окон – программно задаваемые параметры, изменяющиеся в диапазоне от 100 мкс до 10 мс и от 1 до 1024. Программно модифицируются также пороги дискриминации измерительных трактов. ЗУ анализатора имеет двухпортовую организацию, что позволяет выполнять процедуры считывания результатов измерений во время набора статистики.

**В пятой главе** рассматриваются компоненты встраиваемых гальванически изолированных систем регистрации данных, управления и контроля, разработка которых обусловлена сложной электромагнитной обстановкой на плазменных установках и применением в ряде приложений датчиков и актуаторов, находящихся под высоким потенциалом. В рамках распределенной архитектуры систем регистрации на основе гальванически изолированных регистраторов:

- малогабаритные измерительные модули, содержащие нормирующие усилители, тракты А-Ц преобразования, ЗУ со схемой управления, кодек канала связи, размещаются в одном боксе с датчиками и привязываются к их локальной земле;
- для питания измерительного модуля используются встроенный

аккумулятор или DC-DC преобразователь с элементом гальванической развязки на основе трансформатора с объемным витком связи;

- оптоволоконный канал связи, сопрягающий измерительные и интерфейсный модули, выполняет функции “цифровой” развязки;
- интерфейсный модуль, подключаемый к магистрали любого крейта или к системной шине компьютера, обеспечивает сопряжение измерительных модулей с сервером диагностики.

Такие системы характеризуются жесткой привязкой потенциалов локальной земли измерительных модулей к “плавающим” потенциалам земли датчиков, малой длиной аналоговых трасс, связывающих датчики с этими модулями, высоким значением напряжения гальванической изоляции. Модули регистрации ADC1200 и ADC800 таких систем (§5.1) – многоканальные. Они построены по классической схеме с коммутатором сигналов на входе на основе 12-разрядных АЦП с предельным значением частот дискретизации 1 и 40 МГц, соответственно. Цифровой узел приборов строится на базе программируемых матриц. В качестве передатчиков и приемников интегрированного в матрицу кодека применяются излучатели и фотодиоды, ориентированные на работу с пластиковыми оптоволоконными линиями связи. Интерфейсный модуль систем способен обслуживать до 4-х регистраторов. Функционально он содержит ЗУ данных, приемопередающие узлы, обеспечивающие ретрансляцию регистраторам с программно модифицируемой задержкой внешних сигналов синхронизации, прием, декодирование и преобразование формата поступающих от них информационных посылок, схему управления рабочим циклом, формирующую необходимую структуру циклов записи поступающих от регистраторов данных в ЗУ, и интерфейсный узел.

Встраиваемые регистраторы, рассматриваемые в §5.2, отличаются от гальванически изолированных тем, что не имеют собственной развязки в цепях питания. В качестве источника энергии они используют источники питания датчиков, аккумуляторы или специальные AC-DC и DC-DC преобразователи. Эти приборы способны выполнять процедуры предварительной математической обработки отсчетов АЦП в режиме реального времени, накапливать эти отсчеты в буферных ЗУ, передавать “сырые” данные или уже сформированные информационные массивы потребителю через встроенные интерфейсные узлы. Роль приемника формируемых ими потоков данных выполняют последовательные порты ввода/вывода вычислительных машин или контроллеры технологических подсистем, использующие эти данные для формирования сигналов обратной связи в контурах регулирования контролируемых параметров. Широкий

спектр приложений predeterminedил разработку около двух десятков типов приборов этого типа. При построении их измерительных трактов использовались однокристалльные системы сбора данных и ИС АЦП разрядностью от 10 до 16 бит, в том числе и с синхронным режимом формирования отсчетов в диапазоне изменения частот дискретизации от единиц Герц до 64 МГц. Цифровой узел этих приборов строится на основе микроконтроллеров и FPGA. Применение последних позволило уменьшить габариты регистраторов, реализовать программно-модифицируемые алгоритмы их работы, унифицировать набор входящих в их состав интерфейсов. К числу последних относятся кодеки последовательных оптоволоконных каналов связи и контроллер Ethernet. Примерами приложений, в которых используются данные регистраторы, могут служить ИМ дисперсионного интерферометра (§4.2) и система стабилизации формы и вертикального положения плазменного шнура токамака TEXTOR (§5.3). Особенность TEXTOR связана с применением железного сердечника в трансформаторе, формирующем тороидальную компоненту магнитного поля. Из-за его насыщения и характерного для токамаков дрейфа шнура в вертикальном направлении растут потери плазмы и падает время ее удержания. Для устранения этих явлений форма и положение шнура отслеживаются системой магнитных датчиков и многоканальным HCN интерферометром, а их возмущения компенсируются токами корректирующих обмоток. В качестве приборов, ответственных за преобразование в цифровую форму с частотой дискретизации 250 кГц текущих значений сигналов магнитных датчиков и передачу результатов к узлу обработки, в обоих фрагментах системы используются регистраторы ADC2050, обеспечивающие глубокую гальваническую изоляцию измерительных цепей. В узле обработки отсчеты поступают на модуль ввода/вывода крейта PXI. В состав этого крейта включен процессор, вычислительной мощности которого достаточно для формирования в режиме реального времени (с задержкой не более 10 мс) на основе формируемых регистраторами и интерферометром данных корректирующих воздействий, стабилизирующих положение плазменного шнура и его форму. Петли обратной связи контуров регулирования замыкаются с помощью второго модуля ввода/вывода и передатчиков, пересылающих текущие значения корректирующих воздействий по оптоволоконным линиям 16-ти разрядным ЦАП, встроенным в контроллеры источников питания корректирующих обмоток

На установках ИЯФ СО РАН применяется “аппаратно-иерархический” метод построения управляющего комплекса, основанный на использовании

функционально выделенных подсистем. Он позволяет локализовать информационные потоки и свести к минимуму трафик общесистемного информационного и командного обмена (§5.4). В его рамках подсистемы “изолируются” от консоли оператора и становятся независимыми от типа используемой при ее построении вычислительной техники. Взаимодействие контроллеров подсистем с консолью сводится к выполнению процедур загрузки опорных констант перед рабочим циклом и пересылки данных о текущем состоянии оборудования во время выполнения прикладных алгоритмов, не оказывающих существенного влияния на динамические характеристики контуров управления. Подсистемы управления строятся на основе контроллеров, содержащих:

- программируемое вычислительное ядро с приемлемой для решения задач управления и контроля производительностью;
- набор устройств ввода/вывода, в том числе с цифровой и аналоговой формой представления входных/выходных сигналов;
- интерфейсные узлы, решающие задачи сопряжения с консолью оператора, с другими контроллерами комплекса, с встраиваемыми в технологическое оборудование гальванически изолированными измерительными и управляющими модулями.

На установках используется несколько типовых вариантов подсистем управления и контроля. Подсистемы с распределенной топологией размещения аппаратуры строятся по схеме “мастер-раб”. Их ведущий модуль, с ядром на основе 32-разрядного процессора ARM7TDMI, координирует работу подчиненных периферийных контроллеров через локальную сеть на основе мультиплексного канала связи или радиальных оптоволоконных линий. Аналогичную архитектуру, но при построении мастера на основе машин класса x86, имеет вариант подсистем, в котором в качестве основного средства поддержки среды сопряжения используются коммутатор каналов связи Ethernet-10/100 и модули одно и многоканальных адаптеров.

Вариант построения подсистем на основе многофункциональных контроллеров ориентирован на решение задач управления элементами и узлами установок с компактно расположенным оборудованием. Контроллеры этого типа строятся по модульному принципу. Они содержат управляющее ядро на основе процессора или микроконтроллера, сетевой интерфейс, набор модулей ввода/вывода с аналоговой и цифровой формой представления входных/выходных сигналов, развитую подсистему синхронизации и кодеки последовательных оптоволоконных линий связи, используемые для

сопряжения ядра с встраиваемыми в датчики и актуаторы измерительными/исполнительными устройствами. Примером такого прибора может служить контроллер инжектора пучка нейтральных атомов. Функции его управляющего ядра выполняет однокристалльная система сбора данных ADuC836, содержащая микроконтроллер, 12-разрядный ЦАП и двухканальный 16-разрядный сигма-дельта АЦП. Цифровые узлы контроллера, в том числе его 16-канальный ГВИ/Таймер, регистры логических портов ввода/вывода и узел сопряжения с каналом связи Ethernet, построены на основе FPGA. В матрице размещен и узел управления встроенным синхронным 16-канальным регистратором формы импульсных сигналов. Указанные элементы формируют импульсы синхронизации, задающие временную диаграмму работы источников питания инжектора, обеспечивают корректную работу системы питания электронно-оптического тракта, контролируют напряжения и токи на его электродах, фиксируют осциллограммы сигналов в контрольных точках. Встраиваемый модуль контроллера располагается под импульсным потенциалом вытягивающего электрода (20 – 25 кВ). Он управляет работой генератора плазмы, фиксирует осциллограммы токов и напряжений его источников питания.

**В шестой главе** обсуждаются архитектура и компоненты систем автоматизации установок ГДЛ и ГОЛ-3. На ГДЛ (§6.1) контроллеры общего назначения, контроллеры инжекторов и инструментальная ЭВМ объединены в единый комплекс локальным сегментом сети на основе каналов связи Ethernet. Функции управляющего ядра комплекса выполняет контроллер общего назначения, расположенный в высоковольтном блоке. Он координирует работу остальных контроллеров, контролирует их текущее состояние, формирует синхросигналы, обеспечивающие запуск исполнительных элементов технологических подсистем и диагностического комплекса. Инструментальная машина выполняет консольные функции. С ее помощью из базы данных эксперимента выбирается текущий сценарий работы установки, определяются состав используемого оборудования и режимы его работы, задаются опорные значения регулируемых параметров и законы их изменения. Перед началом эксперимента эта информация загружается в контроллеры и определяет текущие алгоритмы их работы. Во время эксперимента инструментальная машина периодически запрашивает у контроллеров информацию о текущем состоянии оборудования и передает ее серверу для архивирования и отображения на мониторах консольных машин. Подобное разделение функций между управляющим и операторским фрагментами системы позволило:

- реализовать заданные требованиями эксперимента динамические

характеристики контуров управления и сделать их независимыми от типа вычислительной техники и уровня ее текущей загрузки;

- организовать согласованную работу всех подсистем экспериментального комплекса;
- контролировать работу этих подсистем и оперативно реализовать безопасные алгоритмы выхода из нештатных ситуаций;
- реализовать набор сервисных функций, обеспечивающих комфортные условия работы оператора.

Аппаратной основой измерительного комплекса ГДЛ являются системы регистрации и сбора данных на основе модулей КАМАК и практически все разновидности новых систем аналогичного назначения. К числу новых компонент относятся:

- 128-канальная синхронная система сбора данных ADC1204-128, фиксирующая сигналы диамагнитных, зондовых, болометрических, магнитных, корпускулярных и иных “медленных” диагностик;
- измерительный комплекс двухканального ДИ, фиксирующий плотность плазмы в двух сечениях магнитной ловушки;
- аналогичный комплекс системы томсоновского рассеяния с кластерной архитектурой, измеряющий локальные значения температуры и плотности электронной компоненты плазмы;
- многоканальные системы сбора данных на основе гальванически изолированных и встраиваемых регистраторов, фиксирующие сигналы, формируемые корпускулярными и зондовыми диагностиками, вторично-эмиссионными датчиками.

Аппаратура, размещаемая в крейтах КАМАК, используется для регистрации сигналов спектроскопической и рентгеновской диагностик, для фиксации динамики потока термоядерных нейтронов.

Ключевыми элементами программного обеспечения системы автоматизации ГДЛ являются база данных параметров эксперимента, построенная на основе реляционной СУБД PostgreSQL, и пакет программ обработки и хранения экспериментальных данных ROOT. Инструментальные машины обеспечивают работу с аппаратурой. Комплект их прикладных программ включает сервисные процессы, обеспечивающие взаимодействие оператора с сервером базы данных эксперимента, и драйверы, обслуживающие интерфейсы измерительных и управляющих подсистем.

Управляющий и измерительный комплексы установки ГОЛ-3 (§6.2) также строятся на основе программируемых контроллеров, многоканальных

синхронных систем регистрации данных и измерительных кластеров. Незначительные отличия управляющего комплекса связаны с применением для построения его функционально выделенных фрагментов подсистем с распределенной топологией размещения оборудования, а для системы синхронизации – многоканальных генераторов синхроимпульсов. На уровне системы связи эти генераторы, непосредственно или через коммутатор, сопрягаются с инструментальной машиной, в которой с помощью графического редактора формируется временная диаграмма работы элементов установки. В процессе инициализации подсистемы эта информация загружается в генераторы и задает текущий режим их работы. Рабочий цикл подсистемы инициируется импульсом запуска, формируемым подсистемой зарядки емкостных накопителей энергии. Последняя может служить примером функционально выделенной подсистемы управления. Она содержит несколько идентичных сегментов, в состав каждого из которых включены модуль мастера на основе процессора ARM7TDI, набор периферийных контроллеров и объединяющий их мультиплексный канал связи. Мастера сегментов сопрягаются друг с другом и с консолью оператора, функции которой выполняет машина класса x86, каналами связи Ethernet-100FX. Один из мастеров является ведущим модулем подсистемы. Он берет на себя реализацию сценария ее работы и управление передачами по каналам связи. Инструментальная машина используется как средство подготовки этого сценария, его загрузки в модуль мастера и для фиксации в архиве с малой временной дискретностью (0.2 – 1 с) текущего состояния оборудования. Подобное построение и логику работы имеют и остальные подсистемы управления: генератором РЭП, вакуумным и газовым оборудованием, оборудованием диагностического комплекса.

Основой измерительного комплекса ГОЛ-3 являются 32-канальные синхронные системы сбора данных ADC1250/32, позволяющие фиксировать сигналы диагностик с 12-разрядным амплитудным разрешением при частотах дискретизации до 50 МГц. Общее количество таких трактов в системе – более 200. “Реликтовые” звенья комплекса в виде аппаратуры КАМАК используются лишь в диагностиках интенсивности потока термоядерных нейтронов и регистрации спектров излучения на двойной плазменной частоте. На модернизацию этих фрагментов направлен цикл работ по созданию быстродействующих регистраторов АЦП12500, синхронных систем регистрации и измерительных кластеров на их основе, 128-канальных систем сбора данных АЦП1204/128.

Программное обеспечение системы автоматизации ГОЛ-3 по функциональному назначению, принципам построения и структуре, из-за

идентичности задач, вычислительной, сетевой и приборной инфраструктуры, аналогично обеспечению установки ГДЛ. Имеющиеся отличия в организации архива, его структуре и форматах записей, носят исторический характер и не являются принципиальными.

В §6.3 в тезисном виде обсуждается текущее состояние и тенденции развития систем автоматизации плазменного эксперимента.

### **В заключении** представлены основные результаты работы:

- Предложен, обоснован и апробирован в плазменном эксперименте метод регистрации данных, основанный на использовании ”цифровой” осциллографии. В рамках его развития:

- сформулированы принципы построения регистрирующей аппаратуры в конструктивах стандарта КАМАК с адекватными требованиям ключевых диагностик техническими характеристиками, разработаны соответствующие аппаратные средства, организовано их мелкосерийное и промышленное производство;

- сформирован функционально полный набор методик для метрологической поверки и настройки аппаратуры регистрации, созданы автоматизированные настроечные и поверочные стенды;

- созданы первые информационно-измерительные системы, ориентированные на поддержку исследований по взаимодействию РЭП с плазмой (установки ГОЛ-1 и ГОЛ-М) и отработку метода формирования РЭП микросекундной длительности с энергосодержанием свыше 100 кДж (установки У-1 и Спин).

- Сформулированы и апробированы в эксперименте принципы построения подсистем управления диагностическим и технологическим оборудованием плазменных установок с помощью периферийных контроллеров с управляющим ядром на основе микропрограммного управляющего автомата, микро-ЭВМ и микроконтроллеров.

- Созданы первые полномасштабные системы автоматизации экспериментальных исследований по физике плазмы и УТС с централизованным управлением (установка ГОЛ-1) и на основе многомашинных управляющих комплексов (установки ГОЛ-М, У-1 и Спин).

- Сформулированы принципы построения, разработаны архитектура, аппаратная и программная инфраструктура систем автоматизации с распределенным управлением на основе периферийных ”интеллектуальных” контроллеров и сетевой среды MIL-STD-1553В. На основе этих разработок построены системы автоматизированного управления, сбора и обработки

экспериментальных данных установок ГОЛ-3 и Амбал-М, функционирующие в режиме реального времени.

- Сформулированы принципы построения, разработаны архитектура, аппаратная и программная инфраструктура:

- многоканальных синхронных систем регистрации экспериментальных данных и измерительных кластеров с распределенной архитектурой;

- систем сбора данных на основе гальванически изолированных и встраиваемых регистраторов;

- измерительных комплексов со встроенными элементами потоковой математической обработки экспериментальных данных.

- На установках ГОЛ-3М, Амбал-М и ГДЛ на основе машин класса x86, каналов связи Ethernet-10/100, многоканальных систем регистрации и сбора данных последнего поколения, измерительных кластеров, специализированных контроллеров и контроллеров общего назначения, созданы полномасштабные информационно-измерительные и управляющие комплексы, обеспечивающие проведение исследований по всей физической программе.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. А.Д. Хильченко. Аппаратные средства систем автоматизации экспериментальных исследований по взаимодействию РЭП с плазмой. // Кандидатская диссертация. Новосибирск, 1986.

2. В.М. Аульченко, А.М. Батраков, В.Р. Козак, Э.П. Кругляков, В.И. Нифонтов, Ю.А. Цидулко, А.А. Шейнгезихт, В.Я. Сазанский, А.Д. Хильченко. Система автоматизации эксперимента на термоядерной установке ГОЛ-1. // В сб. Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ. - Тезисы докладов Всесоюзной конференции. Новосибирск, 1979, с. 37.

3. А.М. Батраков, В.И. Нифонтов, А.Д. Хильченко, Ю.А. Цидулко. Автоматизированная система регистрации, хранения и обработки данных на установке ГОЛ-1. // В сб. Современные методы магнитного удержания, нагрева и диагностики плазмы. - Труды 3-й Всесоюзной школы-конференции. - Харьков, 1982, т. 2, с. 78.

4. С.Г. Воропаев, В.В. Конохов, К.И. Меклер, А.Д. Хильченко, Ю.А. Цидулко. Автоматизация регистрации и обработки данных на установке У-1, генераторе мощного релятивистского электронного пучка для нагрева плазмы. // В сб. Обработка физической информации. - Ереван, 1985, с. 52.

5. А.Д. Хильченко. Регистратор однократных импульсных сигналов с микросекундным циклом преобразования. // ПТЭ, 1986, N3, с. 108-111.
6. В.В. Капранов, Л.Ю. Равер, Ю.Н. Палбенников, О.П. Макаров, Н.К. Александров, А.Д. Хильченко. Аналого-цифровой преобразователь с оперативным запоминающим устройством Ф4226 в стандарте КАМАК. // ПТЭ, №4, 1986, с. 213.
7. А.Д. Хильченко. Широкополосный регистратор формы однократных импульсных сигналов. // ПТЭ, 1987, №3, стр. 124.
8. И.С. Бурмасов, С.О. Измалков, Э.П. Кругляков, Е.П. Семенов, А.Д. Хильченко. Многоканальный ИК интерферометр с управлением начальной фазой. // Диагностика плазмы, М. - Энергоатомиздат, 1989, вып. 6, с. 77-80.
9. В.В. Конюхов, Э.П. Кругляков, А.Д. Хильченко, Ю.А. Цидулко. Система автоматизации экспериментов по взаимодействию РЭП с плазмой на установке ГОЛ-М. // Диагностика плазмы, М. - Энергоатомиздат, 1989, вып. 6, с. 259-262.
10. А.Н. Квашнин, В.В. Конюхов, А.Д. Хильченко. Контроллер последовательного мультиплексного канала связи. // Новосибирск, 1991. - 20с. - Препринт ИЯФ СО РАН, 91-37.
11. А.Н. Квашнин, В.В. Конюхов, А.Д. Хильченко. Интерфейсные платы абонентов последовательного мультиплексного канала связи. // Новосибирск, 1991. - 19с. - Препринт ИЯФ СО РАН, 91-38.
12. А.Н. Квашнин, В.В. Конюхов, А.Д. Хильченко. Интеллектуальный контроллер крейта КАМАК "Миленок". // Новосибирск, 1991. - 23с. - Препринт ИЯФ СО РАН, 91-39.
13. А.Н. Квашнин, В.В. Конюхов, А.Д. Хильченко. Распределенная система управления и обработки информации на базе последовательной линии связи в стандарте MIL-STD-1553B. - 6-е Совещание по диагностике высокотемпературной плазмы, СПб, с. 176, 1993.
14. В.С. Белкин, В.М. Карлинер, А.Д. Хильченко. Структура, аппаратные и программные средства системы автоматизации установки АМБАЛ-М. // Новосибирск, 1999. - 19 с. - Препринт ИЯФ СО РАН, 99-4.
15. Д.В. Моисеев, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко. Регистраторы однократных импульсных сигналов ADC824. // ПТЭ, 1999, N3, с. 81-85.
16. П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко. Многоканальная система гальванически изолированных регистраторов формы однократных импульсных сигналов. // ПТЭ, 2001, N4, с. 75-82.
17. П.В. Зубарев, А.Д. Хильченко. Прецизионный фазовый детектор для

гетеродинной интерферометрической методики измерения плотности плазмы. // ПТЭ, 2003, N2, с. 1-7.

18. В.Ф. Гурко, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко. Быстродействующая синхронная 32-канальная система сбора данных. // ПТЭ, 2003, N5, с. 32-37.

19. В.Ф. Гурко, А.Н. Квашнин, А.Д. Хильченко. Синхронная 128-канальная система сбора данных для диагностического комплекса плазменных экспериментальных установок. // ПТЭ, 2003, N5, с. 38-44.

20. В.Ф. Гурко, П.В. Зубарев, А.Д. Хильченко. 64-канальная система сбора данных для гетеродинной интерферометрической диагностики плотности плазмы. // ПТЭ, 2003, N5, с. 45-50.

21. A.V. Anikeev, P.V. Zubarev, A.D. Khilchenko. The Automation System of the Gas Dynamic Device. // Fusion Sci. and Techn. Trans. V47 N1T, 2004. p.159-161.

22. А.В. Анিকেев, П.В. Зубарев, А.Д. Хильченко. Программное обеспечение системы управления и сбора данных установки газодинамическая ловушка (ГДЛ ИЯФ СО РАН). - Материалы 6-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». - Троицк, 13-18 июня 2005 г. с. 172-174.

23. А.Л. Соломахин, П.А. Багрянский, А.Д. Хильченко. Дисперсионный интерферометр на основе CO<sub>2</sub> лазера. // ПТЭ, 2005, N5, с.96-106.

24. P.A. Bagryansky, A.D. Khilchenko, A.N. Kvashnin. Dispersion interferometer based on a CO<sub>2</sub> laser for TEXTOR and burning plasma experiments. // Rev. Sci. Instruments, 2006, v. 77, N5, p. 053501-1-7.

25. L.N. Vyacheslavov, A.D. Khilchenko, P.V. Zubarev. Application of precise phase detector for density profile and Fluctuation measurements using CO<sub>2</sub> Imaging heterodyne interferometer on LND. // Rev. Sci. Instruments, 2006, v. 77, N10 (Part 2), p. 10E909-1-3.

26. В.В. Поступаев, А.В. Аржанников, А.Д. Хильченко. Диагностический комплекс многопробочной ловушки ГОЛ-3. - Материалы XII Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», г. Троицк, Моск. обл., 2007, с. 168.

27. A. Lisunov, P. Bagryansky, A. Khilchenko. Development of a multichannel dispersion interferometer at Textor // Rev. Sci. Instruments, vol. 79, 2008, p. 10E798-10E708-3.

28. Mitry M, Nicolai D., Neubauer O., Lambertz H.T., Schmidt I., Khilchenko A., Schweer B., Maier U., Samm U. Optimized plasma stabilization at TEXTOR with an advanced real-time digital control scheme. // Fusion engineering and Design, V84, issue 7-11, June 2009, p. 1329-1332.

29. А.Д. Хильченко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин. Многоканальные синхронные системы регистрации экспериментальных данных и измерительные кластеры. - Материалы 13-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». - Троицк, 8-13 июня 2009, с. 30-32.
30. А.А. Иванова, А.Д. Хильченко. Система регистрации энергетического спектра гамма-квантов ядерной реакции  $^{13}\text{C}(\text{P}, \text{G})^{14}\text{N}$ . - Материалы 13-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». - Троицк, 8-13 июня 2009г. с. 85-87.
31. А.Д. Хильченко, П.В. Зубарев, А.Н. Квашнин. Электронный комплекс масс и энерго анализатора нейтральных атомов Аккорд-24.2. - Материалы 13-ой Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». - Троицк, 8-13 июня 2009, с.88-89.
32. А.Д. Хильченко, А.Н. Квашнин, С.В. Иваненко. Измерительный комплекс дисперсионного интерферометра на основе  $\text{CO}_2$  лазера. // ПТЭ, 2009, N3, с. 78-90.

А.Д. ХИЛЬЧЕНКО

**Аппаратная инфраструктура измерительных  
и управляющих систем  
плазменных установок ИЯФ СО РАН**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

---

Сдано в набор 13.07.2010 г.

Подписано в печать 14.07.2010 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.8 печ.л., 1.5 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 23

---

Обработано на РС и отпечатано  
на ротапринтере «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН,  
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11