

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

А.В. Бурдаков, А.Н. Квашнин, В.С. Койдан,
В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, А.Д. Хильченко

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ
И СБОРА ДАННЫХ УСТАНОВКИ ГОЛ-3

ИЯФ 2003-61

НОВОСИБИРСК
2003

Система регистрации и сбора данных установки ГОЛ-3

*А.В. Бурдаков, А.Н. Квашнин, В.С. Койдан,
В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, А.Д. Хильченко*

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера,
630090 Новосибирск, СО РАН

Аннотация

Рассматривается структура аппаратных и программных средств, разработанных для систем регистрации и сбора экспериментальной информации крупных импульсных электрофизических установок. Была поставлена задача увеличения метрологического качества и количества синхронных каналов регистрации при минимизации затрат на новое оборудование и одновременном повышении надежности системы. Связь в системе осуществляется при помощи стандартных сетевых средств (интерфейс Ethernet-100 и протокол TCP/IP). В настоящее время начат перевод основных диагностик на измерения при помощи многоканальных синхронных систем сбора данных ADC1250/32.

Data acquisition system of the GOL-3 facility

*A.V. Burdakov, A.N. Kvashnin, V.S. Koidan,
V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, A.D. Khilchenko*

Budker Institute of Nuclear Physics
630090 Novosibirsk, SB RAS

Abstract

A set of hardware and software solutions developed for the data acquisition systems of large pulsed electrophysical devices is discussed. Metrological performance and number of synchronous ADC channels is to be upgraded with simultaneous improvement of reliability of the system at the best possible value-for-money. Communications in the system are provided by standard interface Ethernet-100 with protocol TCP/IP. Old CAMAC electronics is replaced by a new multichannel synchronous data acquisition systems ADC1250/32 at main diagnostic systems.

Введение

Эффективность работы крупных электрофизических установок во многом зависит от состояния их систем регистрации и сбора экспериментальной информации (далее в тексте также называемых измерительным комплексом). Для установок, работающих в импульсном режиме, системы сбора данных должны иметь, помимо высоких метрологических качеств, еще и высокую надежность, поскольку возможность проведения повторных экспериментов в случае отказа какой-либо диагностической подсистемы зачастую ограничена или отсутствует. Срок службы таких установок обычно превышает 10 лет, за это время происходит физическое и моральное старение того комплекса измерительной аппаратуры, который создавался вместе с установкой.

В этой работе рассматривается вариант построения системы регистрации и сбора данных, разработанный для установки ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН). На установке ГОЛ-3 (описание основных систем которой приведено в [1]) изучается быстрый нагрев плазмы релятивистским электронным пучком и ее последующее удержание в многопробочной магнитной ловушке. Диагностический комплекс установки ГОЛ-3 включает в себя различные методики для измерения параметров электронного пучка и плазмы (см., напр., [2-6]). Диагностическая и управляющая аппаратура комплекса обслуживается электроникой, размещенной в ~40 крейтах КАМАК. Одним из условий, поставленных при разработке новой структуры и аппаратных средств измерительного комплекса, явилось требование обеспечения непрерывности эксперимента, т.е. модернизация систем регистрации и сбора данных не должна была привести к изменению графика проведения экспериментов.

Далее будут кратко рассмотрены основные технические параметры установки и существовавшая на момент начала обсуждаемой работы структура измерительного комплекса (эти сведения приводятся главным образом для того, чтобы были понятны характер и структура экспериментальной информации и другие особенности эксперимента, имеющие отношение к построению системы сбора данных). В последующих разделах обсуждаются: новая структура измерительного комплекса, реализованные аппаратно технические средства и программное обеспечение эксперимента.

Параметры эксперимента и структура измерительного комплекса установки ГОЛ-3

Установка ГОЛ-3 предназначена для исследований в области физики высокотемпературной плазмы и относится по характеру работы к классу импульсных электрофизических установок. Основные параметры эксперимента, определяющие, в том числе, требования к системе сбора данных: плотность плазмы 10^{20} - 10^{23} м⁻³, нагревающий плазму электронный пучок имеет энергию ~ 1 МэВ, ток до 30 кА, длительность ~ 8 мкс. В результате коллективной релаксации пучка плазма нагревается до электронной температуры в несколько килоэлектронвольт. В продольном направлении плазма удерживается многопробочным (гофрированным) магнитным полем с $H_{\max}/H_{\min}=5.2/3.2$ Тл, периодом гофрировки 22 см, при полной длине соленоида ~ 12 м. Характерное энергетическое время жизни плазмы после прекращения инжекции пучка составляет ~ 0.5 мс.

Указанные технические характеристики установки обусловили применение для регистрации экспериментальных данных широкополосной и быстродействующей измерительной аппаратуры, а так же указали на необходимость учета при построении измерительного комплекса возникающих во время эксперимента импульсных электромагнитных и рентгеновских наводок (при поглощении электронного пучка с пиковой мощностью ~ 30 ГВт в приемнике-коллекторе возникает тормозное излучение с характерными энергиями фотонов в сотни кэВ и с мощностью ~ 100 МВт).

Измерительный комплекс установки ГОЛ-3 в течение длительного времени строился на основе аппаратуры и крейтов КАМАК [7]. Это решение было типичным и наиболее распространенным для большинства крупных как отечественных, так и зарубежных электрофизических установок, создававшихся в 1980-1990 годы. Крейты КАМАК помещены в экранированные боксы, имеющие достаточную защиту от импульсных электромагнитных наводок, в том числе по цепям питания, управления и синхронизации. Связь управляющей ЭВМ с контроллерами крейтов К0607 [8] производилась по последовательным линиям связи на основе коаксиального кабеля типа РК-75, а для систем сбора данных нового поколения, которые будут обсуждаться позже - на основе оптоволокон. Длина коммуникационных трасс, сопрягающих измерительную аппаратуру с управляющей ЭВМ, зависела от места расположения экран-боксов и доходила до 100 м.

Функциональный состав аппаратуры измерительного комплекса определялся задачами и потребностями эксперимента. Наиболее массовым приборами были регистраторы формы импульсных сигналов на основе быстродействующих АЦП. Для обеспечения большей части диагностик использовались АЦП с частотой дискретизации 20-50 МГц. Для фиксации

сигналов, требующих более высокого временного разрешения (системы томсоновского рассеяния, измерение нейтронного и γ -излучений), применялись 8-разрядные АЦП с частотой дискретизации 100-500 МГц. Часть систем использовала более медленные каналы регистрации. Помимо АЦП, диагностический комплекс включал в себя и ряд вспомогательных блоков (управляемые стабилизированные источники питания, таймеры, формироваватели и т.п.).

По мере развития диагностических методик, особенно многоканальных, постоянно повышались и требования к характеристикам аппаратуры регистрации экспериментальных данных как по количеству измерительных каналов, динамическому диапазону (разрядности) АЦП и по длине развертки (количеству измеряемых точек по времени), так и по синхронности многоканальных измерений. Частично эти проблемы решались заменой используемых модулей КАМАК на вновь разработанные модули с улучшенными метрологическими характеристиками. Однако со временем стало очевидно, что система сбора данных комплекса ГОЛ-3 нуждается в качественных изменениях, связанных с потребностью использования во многих диагностических трактах синхронных измерительных подсистем с числом каналов не менее нескольких десятков, имеющих стандартные, достаточно быстрые каналы сопряжения с вычислительной техникой. Построение таких подсистем на базе модулей КАМАК сталкивалось с негибкостью системной магистрали крейта, приводящей к использованию большого числа внешних кабельных линий межмодульной связи, с низкой надежностью разъемных соединений крейта, а так же с относительно малой скоростью межмодульной передачи данных. Применительно к ГОЛ-3, с его сложившейся инфраструктурой, фактором, сдерживающим резкое увеличение числа трактов регистрации данных, были также габариты и энергопотребление крейтов КАМАК.

С учетом того, что модернизация измерительного комплекса установки ГОЛ-3 должна была проводиться параллельно с его эксплуатацией, было принято решение о поэтапном переводе имеющегося оборудования на стандартные оптоволоконные каналы связи Fast Ethernet и новые интеллектуальные крейт-контроллеры, а так же о разработке функционально законченных многоканальных синхронных подсистем сбора данных универсального назначения, использующих конструктив «Евромеханика», в качестве управляющего ядра – встраиваемый процессорный модуль, а в качестве среды сопряжения с вычислительной техникой - Ethernet-FX и протоколы TCP/IP.

Реализация измерительного комплекса на новой аппаратной базе

При модернизации измерительного комплекса ГОЛ-3 в основу были положены принципы:

- простоты построения сложных распределенных измерительных комплексов на основе функционально выделенных многоканальных измерительных подсистем;
- гальванической развязки подсистем друг от друга и от вычислительной техники;
- синхронной многоканальной регистрации сигналов в рамках отдельных подсистем и всего измерительного комплекса;
- построения на основе современной элементной базы широкодиапазонных АЦП для всех измерительных трактов (минимум 12 двоичных разрядов);
- модульности построения подсистем регистрации;
- высокоскоростного обмена данными подсистем с вычислительной техникой, основанном на применении стандартных связанных интерфейсов и протоколов;
- дистанционного управления оборудованием подсистем в рамках клиент-серверной технологии построения прикладного программного обеспечения;
- оптимизации технико-экономических характеристик новой аппаратуры.

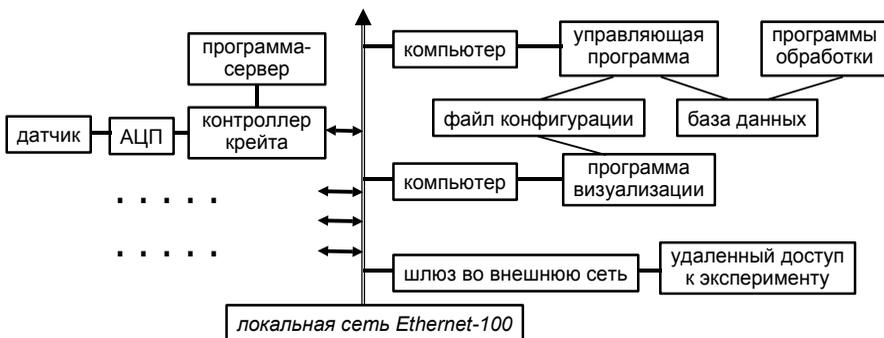


Рис.1. Структура аппаратных и программных средств системы сбора данных.

В качестве базового конструктива для подсистем регистрации нового поколения был выбран конструктив «Евромеханика» с формфактором базового модуля 3U*4НР. Модульный принцип построения подсистем на

основе архитектуры "master-slave" и специализированной системной магистрали (с одним ведущим – интеллектуальным контроллером крейта) позволил устранить практически все указанные ранее недостатки КАМАК и перейти к применению стандартных сетевых технологий для сопряжения с вычислительной техникой. Обобщенная структурная схема построения подсистем регистрации нового поколения показана на рис.1. Функционально в их состав входят: интеллектуальный крейт-контроллер, набор многоканальных модулей регистрации с синхронным режимом измерений текущих значений амплитуды входных сигналов и накопления результатов измерений в буферных ЗУ, а так же встроенный источник питания.

Контроллер крейта использует в качестве логического ядра мезонинный коммуникационный модуль SO-DIMM Webnet/ARM на базе 32-х разрядного процессора ARM7TDMI S3C4530, работающего под управлением операционной системы uCLinux. В перезаписываемое постоянное запоминающее устройство модуля объемом 8 Мб заносятся: предустановленная ОС uCLinux, протоколы поддержки сетевого интерфейса, файловая система и прикладной код управления модулями регистрации. Это программное обеспечение инициализируется при включении питания. Для сопряжения с управляющим компьютером контроллер использует стандартный сетевой интерфейс Ethernet-10/100 и протокол TCP/IP, при этом обеспечивается скорость обмена до 2.5 Мбайт/с при выполнении всех процедур, связанных с контролем корректности передачи длинных информационных массивов. Естественным плюсом такой схемы построения контроллера является простота интеграции новых подсистем регистрации в измерительный комплекс ГОЛ-3, в том числе и с помощью решений типа клиент-сервер, а так же независимость подсистем и их аппаратных средств сопряжения от платформы управляющих компьютеров.

С системной точки зрения такая схема построения подсистем регистрации удобна тем, что позволяет, при наличии общего для диагностического комплекса установки канала связи Ethernet-10/100, использовать любое рабочее место для работы с конкретной диагностикой (аппаратура которой может быть распределена по нескольким пространственно разнесенным крейтам).

В качестве первой из числа новых на комплексе ГОЛ-3 использовалась 32-канальная синхронная подсистема сбора данных ADC1250/32 [9], имеющая:

- 12-разрядные тракты аналого-цифрового преобразования с возможностью программного сдвига положения нуля шкалы преобразования, ориентированного на простоту адаптации к параметрам входного сигнала;
- частоту дискретизации АЦП до 40 (50) МГц, с программным выбором ее текущего значения;

- буферное ЗУ объемом 32К слов на канал (разработан и производится также вариант регистратора с объемом внутренней памяти до 32М слов на канал);
- программный выбор шкалы преобразования АЦП по амплитуде (1.25 В, 2.5 В, 5 В, 10 В);
- разброс по времени измерения текущих амплитуд входных сигналов между двумя любыми каналами не более 200 пс;
- энергопотребление не более 70 Вт (блок питания с линейной схемой стабилизации).

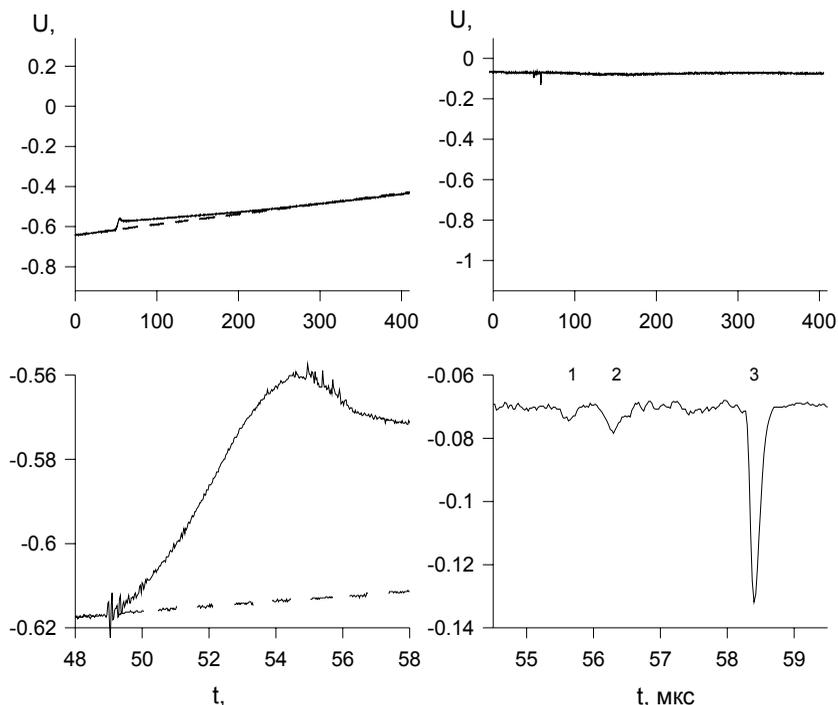


Рис.2. Типичные сигналы: а) датчика диамагнетизма плазмы (пунктиром показан сигнал, наводимый магнитным полем соленоида); б) сигнал томсоновского рассеяния; сверху – полный сигнал, измеряемый АЦП, внизу – фрагмент. На сигнале рассеяния цифрами обозначены: 1 – сигнал рассеяния в канале, соответствующем $E_e=0.3$ кэВ, 2 и 3 – калибровочные сигналы, задержанные по времени на 0.6 и 2.8 мкс относительно сигнала рассеяния.

ADC1250/32 занимает $\frac{1}{2}$ ширины стандартной корзины 3U и состоит из контроллера и четырехканальных модулей регистрации (от 1 до 8 шт. на

систему). Таким образом, поскольку в габаритах крейта КАМАК можно разместить две корзины 3U, то при переходе на новые подсистемы регистрации появляется возможность создания диагностических комплексов с большим числом каналов, необходимых, например, для построения томографических систем или современных систем магнитной диагностики плазмы. К дополнительным плюсам выбранной структуры построения подсистем относится то, что базовый конструктив является достаточно гибким (выпускаются корзины разных геометрических размеров, в т.ч. небольшие). Это позволяет, при необходимости, без особых усилий строить подсистемы измерения, требующие нестандартного подхода, например, сигналов с датчиков, находящихся под высоким потенциалом или требующих усиленной электромагнитной и радиационной защиты аппаратуры.

Иллюстрацией функциональных возможностей ADC1250/32 служат приведенные на рис.2 сигналы датчика диамагнетизма плазмы и одного из каналов системы регистрации томсоновского рассеяния (1.06 мкм, $\theta=90^\circ$). Как видно из рисунка, достаточно большой динамический диапазон подсистемы позволяет наблюдать на диамагнитном сигнале появление некоторой МГД активности плазмы, начиная с момента 54.7 мкс (начало инъекции пучка в момент $t=49$ мкс). Для фиксации параметров более медленных процессов (длительностью до нескольких секунд) на ГОЛ-3 готовится к вводу в эксплуатацию еще одна подсистема регистрации с аналогичной архитектурой - ADC1204/128 (число каналов – до 128-ми, частота дискретизации АЦП до 4 МГц, АЦП - 12 бит, 3U - 1M отсчетов/канал) [10].

В будущем планируется дальнейшее расширение номенклатуры аппаратных средств диагностического комплекса (более быстродействующие модули АЦП, вспомогательные модули коммутации сигналов и т.д.). Для интеграции остающегося в эксплуатации оборудования в стандарте КАМАК в состав нового измерительного комплекса уже разработан и апробируется в реальной работе интеллектуальный крейт-контроллер на базе уже упоминавшегося процессорного модуля Webnet/ARM с сетевым интерфейсом Ethernet-10/100. С точки зрения пользователя доступ как к новым подсистемам регистрации, так и к аппаратуре КАМАК предполагается единообразным, что упростит унификацию драйверов и обеспечит совместимость старых и новых систем на уровне базы данных.

Программное обеспечение

Одним из условий при модернизации измерительного комплекса установки ГОЛ-3 было сохранение совместимости на уровне базы экспериментальных данных и прикладных программ пользователя. Во время

эксперимента рабочая программа считывает с диска файл конфигурации эксперимента. Этот файл организован в виде набора таблиц, каждая строка в котором описывает какой-либо сигнал или устройство (название, тип прибора, необходимую информацию о загружаемых пределах и регистрах, адрес прибора в измерительной системе). Перед началом эксперимента производится проверка доступности и работоспособности измерительных приборов, перечисленных в выбранном файле конфигурации эксперимента. Это позволяет работать без изменения таблиц конфигурации при частично отключенном оборудовании (отладочные режимы или аварийные ситуации). При вводе (изменении) файла конфигурации оператору предлагается контекстно-зависимый выбор из фиксированного множества допустимых ответов (значений), что уменьшает вероятность ошибочного ввода недопустимых начальных уставок в диагностическую аппаратуру. При записи начальных уставок в электронные блоки производится проверка соответствия записанного значения табличному (в случае, если есть аппаратно реализованная возможность чтения записанных регистров) и контролируются ответы блока. В случае несоответствия любого из этих параметров ожидаемому ответу выдается соответствующая информация.

После загрузки пределов аппаратура ожидает импульса внешнего запуска. По завершении цикла измерений у оператора есть две возможности – просмотр (визуализация) результатов измерения и запись полученных сигналов в базу данных. Структура базы данных для новой системы остается неизменной и совпадает со структурой, описанной в [7]. Наивысшим логическим уровнем в файле базы данных является уникальный идентификатор импульса - см. рис.3.

Записываются:

- а) служебная информация (дата, время, номер импульса, текстовый комментарий);
- б) цифровая информация о параметрах эксперимента (уставки таймеров, источников питания, показания приборов и т.п.), при этом запись может быть переменной длины;
- в) информация, измеренная АЦП (преобразованная в специальный графический формат GRAF), записи также могут иметь переменную длину;
- г) в качестве отдельной записи включается файл конфигурации эксперимента;
- д) информация в формате, определяемом пользователем (экспортируется в файл).

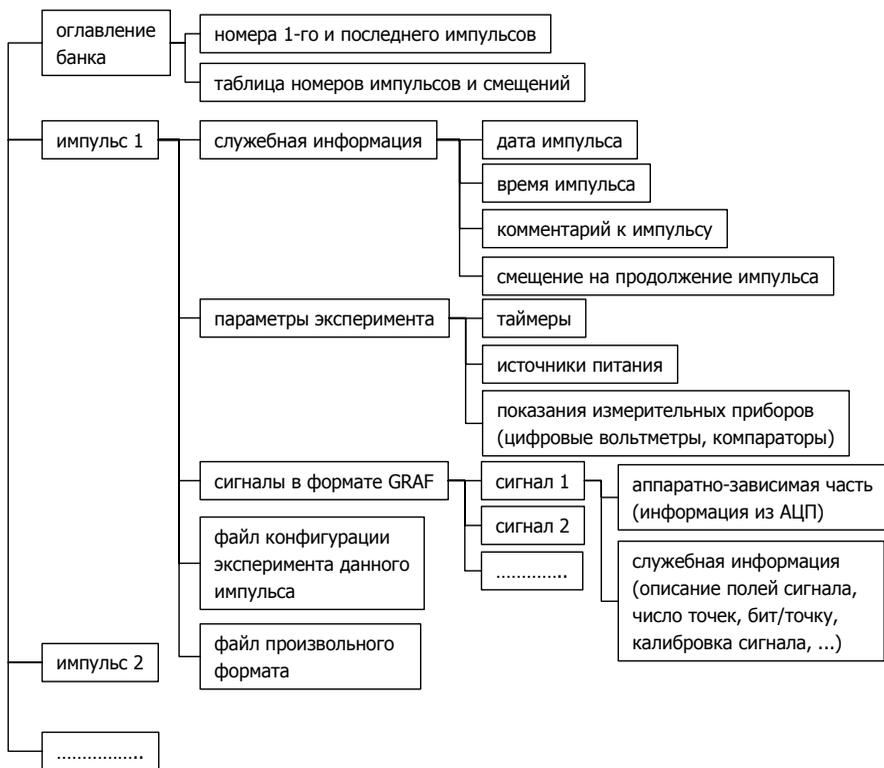


Рис.3. Структура банка данных ГОЛ-3.

Добавление новой информации идет только в конец файла. Большая часть записей производится в формате GRAF. Основные особенности этого формата:

- запись (рекорд) содержит в себе информационную и служебную части;
- информационная часть записывается в формате АЦП и является аппаратно-зависимой;
- небольшая служебная часть делает запись аппаратно-независимой и содержит сведения о логической структуре информационной части и о коэффициентах перевода ее в физическое поле измерительного прибора (вольты, секунды и т.п.);
- коэффициенты перевода физического поля прибора в поле параметров измеряемой величины хранятся в отдельных записях калибровок (которые могут изменяться в ходе эксперимента).

Используемый формат GRAF позволяет пользователю работать в логическом поле измерительного прибора (кванты АЦП), физическом поле прибора (вольты, секунды), либо (с использованием записанной калибровки) в физическом поле измеряемой величины. Такая структура делает возможной смену типа измерительного прибора и первичного датчика в ходе эксперимента, поскольку программа обработки пользователя получит данные в аппаратно-независимом виде. При сохранении длинных сигналов используется программное сжатие по алгоритму, близкому к методу группового кодирования (RLE), которое применяется отдельно к старшему и младшему байтам аппаратного слова.

Переход к новой структуре организации измерительного комплекса (локальная сеть Ethernet) приводит к организации программного обеспечения по типу клиент-сервер. В качестве серверных выступают программы, размещаемые в оперативной памяти контроллеров крейтов “Евромеханика” (и аналогичных им по структуре контроллеров крейтов КАМАК). Эти программы обеспечивают обработку запросов на загрузку регистров в измерительные модули и передачу полученной информации. Программка-клиент располагается на любой из вычислительных машин, подключенных к этой сети, и представляет собой графическую консоль оператора.

Используемый на установке ГОЛ-3 формат базы данных позволяет эффективно использовать вычислительные ресурсы. Это достигается за счет хранения большей части информации в компактном аппаратно-зависимом виде при минимальных затратах на служебную информацию. В то же время существуют задачи, которые могут потребовать использования получившей широкое международное распространение в физике плазмы системы сбора данных MDSplus [11] (например, использование сложных программных продуктов, разработанных для среды MDSplus, или предоставление собственных экспериментальных результатов в международные базы данных, имеющие тот же формат). В предложенной структуре системы сбора данных эта задача решается путем использования отдельной программы-сервера, которая получает запросы в формате MDSplus, взаимодействует с базой данных ГОЛ-3 и транслирует передаваемую информацию в формат MDSplus.

Заключение

В ходе работ по модернизации измерительного комплекса установки ГОЛ-3 проводится постепенная замена имеющегося парка аналого-цифровых преобразователей на приборы нового поколения, имеющие улучшенные метрологические и экономические характеристики. Производится реорганизация структуры измерительного комплекса установки с тем, чтобы использовать стандартные сетевые решения (интерфейс Ethernet-10/100 и протокол TCP/IP) для связи управляющих компьютеров с измерительным оборудованием. Такое решение позволяет использовать разнородные

вычислительные средства (аппаратные платформы и операционные системы) и, при необходимости, организовывать удаленное участие в эксперименте. Эксплуатация опытной партии новой электроники показала ее высокую надежность.

Благодарности

Авторы благодарят А.М.Батракова, В.В.Конюхова и К.И.Меклера за ценные обсуждения и советы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минпромнауки и в рамках проектов РФФИ 99-07-90225, 00-02-17649 и 03-02-16271.

Литература:

1. Agafonov M.A., Arzhannikov A.V., Astrelin V.T., et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 38, №12A, A93 (1996).
2. Бурдаков А.В., Воропаев С.Г., Койдан В.С., и др. // Физика плазмы, 20, 223 (1994).
3. Бурдаков А.В., Койдан В.С., Лебедев С.В., и др. // Физика плазмы, 20, 70 (1994).
4. Бурдаков А.В., Денисенко П.В., Мельников П.И., и др. // Сб: "Тезисы докладов 9-го Совещ. по диагностике высокотемпературной плазмы", Санкт-Петербург, 56 (1997).
5. Акентьев Р.Ю., Бурдаков А.В., Иванов И.А., и др. // Сб: «X Всероссийская Конф. по диагностике высокотемпературной плазмы. Тезисы докладов», Троицк, 71 (2003).
6. Бурдаков А.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Суляев Ю.С. // Сб: «X Всероссийская Конф. по диагностике высокотемпературной плазмы. Тезисы докладов», Троицк, 42 (2003).
7. Койдан В.С., Конюхов В.В., Поступаев В.В., и др., Препринт ИЯФ СО РАН 2000-2, Новосибирск, 2000.
8. Нифонтов В.И., Орешков А.Д., Путьмаков А.Н., Скарин И.А. Препринт ИЯФ СО АН СССР 82-90, Новосибирск, 1982.
9. Гурко В.Ф., Квашнин А.Н., Моисеев Д.В., Хильченко А.Д. // ПТЭ, 2003, №5 (в печати).
10. Гурко В.Ф., Квашнин А.Н., Моисеев Д.В., Хильченко А.Д. Препринт ИЯФ СО РАН 2003-3, Новосибирск, 2003.
11. Stillerman J., Fredian T., Klare K., Manduchi G. // Review of Scientific Instruments, 68, 939 (1997).

*А.В. Бурдаков, А.Н. Квашинин, В.С. Койдан,
В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, А.Д. Хильченко*

Система регистрации и сбора данных установки ГОЛ-3

*A.V. Burdakov, A.N. Kvashnin, V.S. Koidan,
V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, A.D. Khilchenko*

Data acquisition system of the GOL-3 facility

ИЯФ 2003-61

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 19.09.2003

Сдано в набор 22.09.2003

Подписано в печать 23.09.2003

Формат 60x90 1/16 Объем 1.1 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 125 экз. Бесплатно. Заказ № 61

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