

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 533.9.07

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ТОКАМАКА T-11M

© 2019 г. А. С. Джурик*, А. М. Белов

ГНЦ РФ «Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»
Россия, 142190, Москва, Троицк, ул. Пушкиных, владение 12

* e-mail: adzhurik@triniti.ru

Поступила в редакцию 29.01.2018 г.

После доработки 29.03.2018 г.

Принята к публикации 25.04.2018 г.

Представлены основные характеристики действующей системы регистрации, хранения и представления экспериментальных данных токамака T-11M, а также мотивы необходимости ее полной замены. Приведены требования к новой системе и ее параметры, достигнутые в результате ее создания.

DOI: 10.1134/S0032816218060058

1. ВВЕДЕНИЕ

Основная действующая система регистрации, хранения и представления экспериментальных данных токамака T-11M была введена в эксплуатацию более 17 лет назад (в 1999 году) и несколько раз модернизировалась, как в части программно-го обеспечения, так и в аппаратной части.

В части регистрации экспериментальных данных (полный ток в плазменном шнуре, напряжение обхода, плотность плазмы, излучение мягкого и жесткого рентгена и некоторых других диагностик) система построена на основе четырех 16-канальных несинхронных аналого-цифровых преобразователях (а.ц.п.). Основные параметры регистрации аналоговых сигналов: 64 несинхронных канала; диапазон измерений ± 5 В; разрядность а.ц.п. 12 бит; частота регистрации на канал 50 кГц; объем собираемой информации за импульс до 2 Мбайт при длительности разряда 320 мс. Программное обеспечение представления данных было реализовано в среде MS DOS.

На сегодня эта система морально и физически устарела и не обеспечивает возросших требований новых диагностик в части быстродействия и числа каналов регистрации.

2. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ, ХРАНЕНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

2.1. Требования

Система должна обеспечить регистрацию имеющихся сигналов, а также принять сигналы ряда

других диагностик, которые ранее имели свои собственные системы регистрации данных. Также она должна иметь существенно более высокую частоту регистрации сигналов для обеспечения регистрации не только медленных процессов, но и существенно более быстрых, например развитие неустойчивости срыва (характерное время развития ~ 10 мкс).

Основные требования к характеристикам регистратора системы: наличие не менее 80 каналов; разрядность а.ц.п. 14–16 бит; частота дискретизации не менее 1 МГц на канал; синхронность регистрации сигналов по всем каналам; дифференциальный вход а.ц.п. для подавления синфазных помех; несколько входных диапазонов со смещением; а.ц.п. должен иметь как низкоомный вход (50 Ом), так и высокоомный вход (от 100 кОм); обеспечение объема памяти модуля а.ц.п. для записи всего разряда, а при отсутствии памяти на борту модуля а.ц.п. обеспечение соответствующей скорости записи непосредственно в компьютер; гальванические развязки как в связке первичный датчик—вход а.ц.п., так и шасси (крейт)—управляющий компьютер; обеспечение предварительной обработки сигналов.

Кроме того, система должна обеспечить/иметь:

- регистрацию видеоизображения как самой плазмы, так и взаимодействия плазмы с элементами камеры токамака и в видимом диапазоне (в том числе и с использованием светофильтров), и и.к.-диапазоне; видеокамеры должны иметь скорость съемки не менее 250 кадров/с;

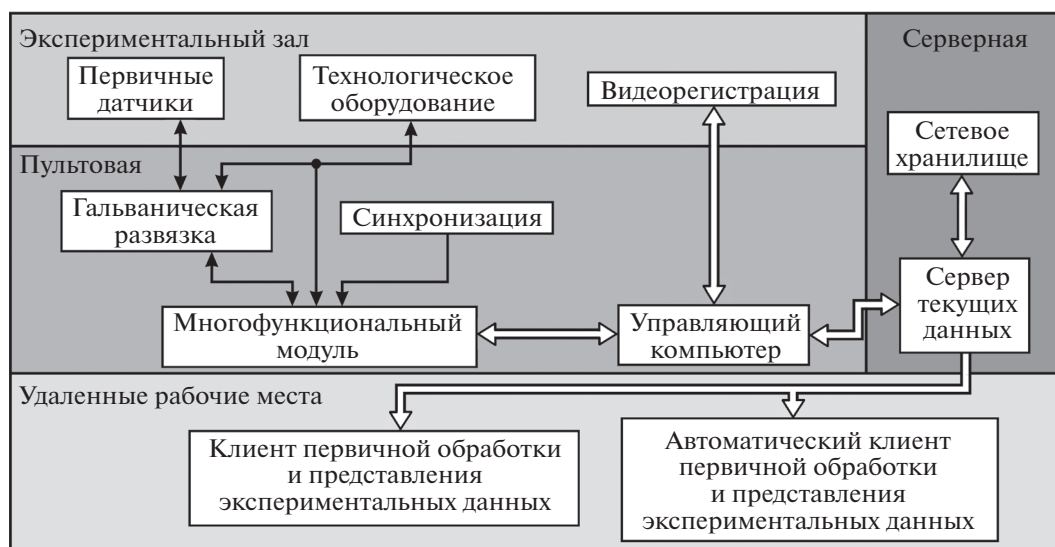


Рис. 1. Структурная схема системы регистрации, хранения и представления экспериментальных данных установки Т-11М.

- электропитание шасси (крейта) от источника бесперебойного питания (и.б.п.), причем во время разряда должен быть обеспечен физический разрыв линий силового кабеля электропитания самого и.б.п., что необходимо для исключения возможных помех по электросети во время разряда токамака;

- в своем составе сервер экспериментальных (“сырых”) и обработанных данных, включая паспорта разрядов, а также и интерфейс представления данных, обеспечивающих быстрое представление в различной форме больших объемов информации, причем порядок доступа к данным должен осуществляться только авторизованным пользователям, согласно политики прав доступа;

- программное обеспечение должно работать как на актуальных операционных системах — MS Windows 7...10, так и на MS Windows XP (хотя поддержка ее и завершена) и должно уметь работать не только с форматами данных, действующими на установке токамак Т-11М, но и с более ранними форматами, кроме того, оно должно иметь возможность воспринимать и будущие форматы данных, пока еще не определенные;

- регистрацию технологических сигналов, а также задание и контроль параметров работы технологического оборудования и систем обеспечения безопасности эксплуатации оборудования.

2.2. Реализация

На рис. 1 представлена структурная схема разработанной и введенной в эксплуатацию системы регистрации, хранения и представления экспериментальных данных токамака Т-11М.

Система регистрации аналоговых сигналов реализована в стандарте модульного измерительного оборудования производства National Instruments, основанного на компьютерной шине передачи данных PCI, PXI. В системе организовано 96 каналов и используется шасси PXIe-1078 со встроенными функциями тактирования и синхронизации с опорным тактовым сигналом частотой 10 и 100 МГц, подаваемым на все модули и шину запуска PXI. В шасси установлены многофункциональные модули NI PXIe-6358, NI PXIe-6368, NI PXIe-6133, содержащие многоканальные а.ц.п., цифроаналоговые преобразователи, счетчики, таймеры и входные/выходные регистры. Эти модули используются для регистрации данных с различными частотами от 1.25 до 2.5 МГц, диапазоном входных данных $\pm(1.25-10\text{ В})$, разрядностью 14–16 бит и входным сопротивлением $>100\text{ кОм}$, а также для задания и контроля параметров работы технологического оборудования (счетчики, таймеры и входные/выходные регистры). Для связи управляющего компьютера с шасси используются модули PXIe-8375 и PCIe-8375, связь организована с помощью оптоволоконного кабеля длиной 100 м, который обеспечивает скорость до 838 Мбайт/с.

Для видеорегистрации взаимодействия плазмы с литиевой диафрагмой [1] использована цветная высокоскоростная камера Baumer HXG20C. Камера позволяет снимать с минимальной экспозицией 4 мкс, со скоростью от 338 кадров/с, с разрешением 2048×1088 , с увеличением скорости при уменьшении разрешения (4637 кадров/с с разрешением 2048×64).

Для связи с управляющим компьютером используются два порта Gigabit Ethernet (GigE), что

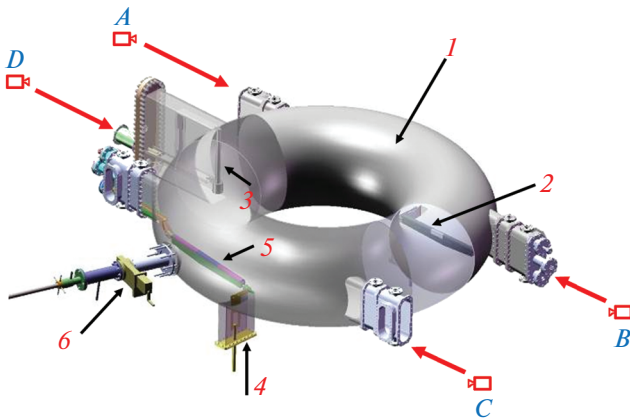


Рис. 2. Схема токамака и положения (A–D) съемки высокоскоростной видеокамерой. 1 – камера токамака; 2 – первый продольный литиевый лимитер; 3 – вертикальный литиевый лимитер; 4 – графитовый лимитер; 5 – второй продольный литиевый лимитер; 6 – криогенная мишень.

обеспечивает высокую скорость передачи данных. Поддержка камерой технологии Power over Ethernet (PoE) позволило организовать не только питание камеры по Ethernet, но и развязку по питанию. Для организации питания, связи с управляющим компьютером и защиты от внешних и перекрестных (между витыми парами) помех использован Ethernet-кабель 7-й категории с экра-

нированием каждой витой пары и общим экранированием. Максимальная длина кабеля в 100 м позволила установить управляющий компьютер на рабочем месте. Камера поддерживает запуск по внешнему синхроимпульсу.

Съемка ведется с четырех разных ракурсов (рис. 2), с разными скоростью, экспозицией, диафрагмой и т.д., также при съемке используются различные узкополосные интерференционные фильтры (для линий H α , LiI, LiII).

Данные, полученные при помощи системы видеорегистрации, синхронизированы с системой регистрации аналоговых данных, и программно организована возможность просмотра видеок кадров в системе графического представления аналоговых сигналов (рис. 3).

Повышение частоты дискретизации а.ц.п., числа каналов а.ц.п. и использование видеорегистрации приведет к увеличению объема регистрируемых данных за разряд токамака почти на два порядка (так при регистрации разряда длительностью 320 мс по 100 каналам с частотой дискретизации 1 МГц и видеоизображения с частотой 300 кадров/с с разрешением 1920 $\times$ 1080 объем регистрируемых данных будет составлять $\sim$ 150 Мбайт, а при среднем количестве разрядов 2000 в год составит $\sim$ 300 Гбайт). Таким образом, при требовании к серверу обеспечения быстрого доступа к данным разрядов токамака за последние несколь-

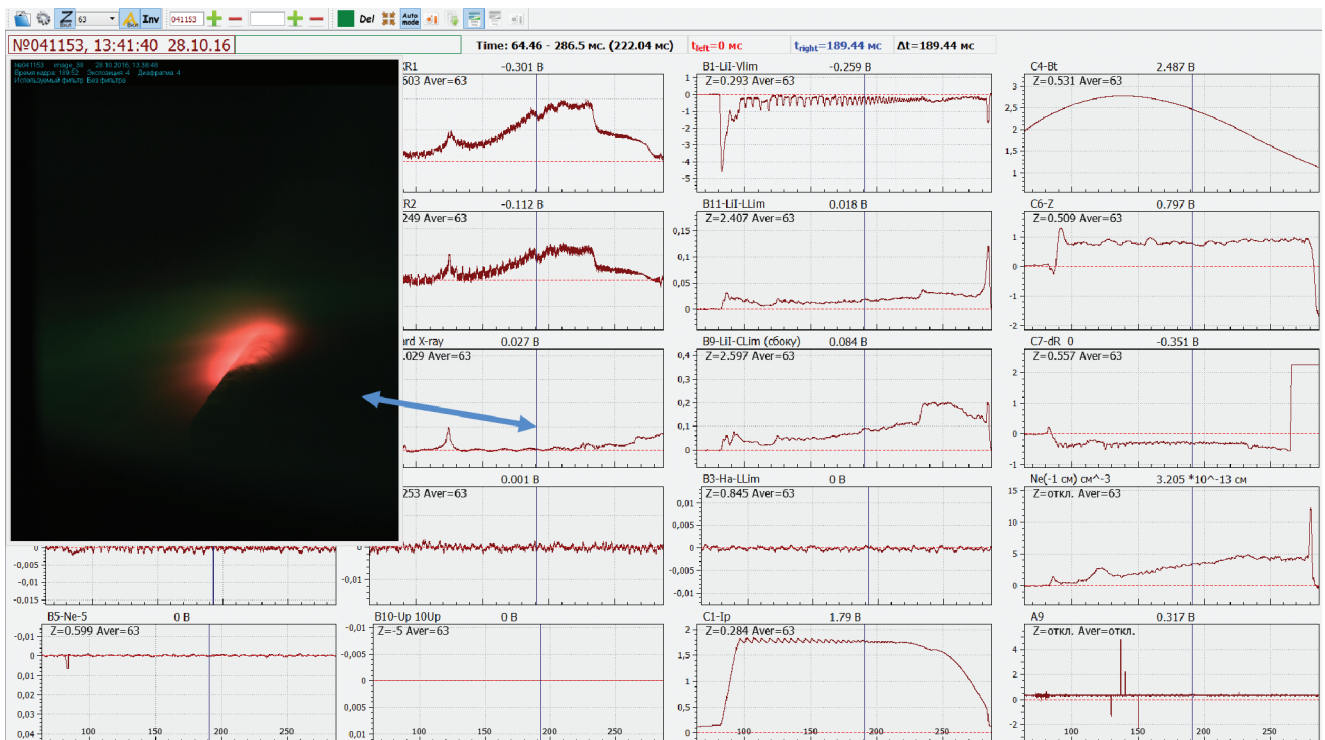


Рис. 3. Интерфейс программы представления данных с примером данных, полученных с помощью системы.

ко лет размер хранилища должен быть не менее 1 Тбайт.

Для организации работы системы хранения на сервер была установлена операционная система FreeBSD, что позволило не только организовать хранилище данных, но и сервер времени для синхронизации времени всех компьютеров, находящихся в сети. Для сохранности данных на сервере организован массив типа RAID-1 (зеркалирование данных), обеспечивающий надежность сохранности данных, а также снижающий необходимость в дополнительных резервных копиях.

В дополнение к файловому серверу было организовано сетевое хранилище с поддержкой 6 дисков с общим объемом памяти до 24 Тбайт. На сетевом хранилище размещаются как архивные данные, так резервные копии актуальных данных. В сетевое хранилище установлено два жестких диска объемом 2 Тбайт и также организован массив типа RAID-1. При необходимости в него могут быть добавлены жесткие диски, а RAID-1 преобразован в RAID-10, что позволит обеспечить не только безопасность данных, но и увеличить в 2 раза скорость чтения и записи. Использование файлового сервера совместно с сетевым хранилищем позволило не только увеличить объем хранимой информации, но и существенно снизить риск ее безвозвратной потери.

Для обеспечения бесперебойной работы файлового сервера и сетевого хранилища, они подключены к источнику бесперебойного питания с мощностью 1000 ВА.

Для работы с системой регистрации аналоговых сигналов и системой видеорегистрации разработан пакет программ, позволяющий в автоматическом режиме сохранять данные на сервер, а также их просматривать и обрабатывать [2]. Программное обеспечение работает под актуальными ОС Windows 7–10, а также Windows XP.

Пакет программного обеспечения включает:

- программу управления системой регистрации аналоговых сигналов;
- программу управления системой видеорегистрации;
- клиента обработки и представления данных.

Программы управления системой регистрации аналоговых сигналов и системой видеорегистрации позволяют задавать параметры их работы и автоматически сохранять на сервер полученные данные.

Клиент обработки и представления данных работает в двух режимах: ручном и автоматическом. Автоматический клиент представляет собой компьютер, который выводит на два 55-дюймовых монитора, расположенных в пультовой, парамет-

ры разряда и графики сигналов диагностик. Данный клиент автоматически обновляет данные на мониторах после каждого пуска установки.

Основные характеристики клиента для работы с аналоговыми данными:

- работа в режиме полного экрана;
- настройка количества выводимых графиков;
- настройка параметров для каждого графика;
- работа с несколькими протоколами исходных данных;
- возможность просматривать данные разных импульсов одновременно;
- синхронный вывод для всех графиков значений времени и амплитуды в заданной точке;
- коррекция нулевого уровня, усреднение по времени зашумленных данных, инверсия сигнала;
- быстрый поиск необходимого разряда по его номеру;
- отображение снимков, полученных с камеры с привязкой по времени;
- экспорт данных в текстовый файл.

Интерфейс программы представлен на рис. 3.

3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ

В дальнейшем планируется развивать возможности новой системы регистрации, представления и хранения экспериментальных и технологических данных установки Т-11М. Так, планируется добавить в систему видеорегистрации вторую высокоскоростную камеру, работающую в видимом диапазоне, и камеру, работающую в и.к.-диапазоне, и в систему регистрации аналоговых сигналов добавить второе шасси с 48 быстрыми каналами и подключить две болометрические камеры-обскуры на 32 канала каждая.

Реализованная система хранения позволяет, по мере необходимости, значительно увеличить объем хранилища.

Авторы выражают благодарность С.В. Мирнову, М.В. Киселеву и В.Б. Лазареву за поддержку в работе.

Работа была выполнена при поддержке госкорпорации РОСАТОМ в рамках госконтракта № Н.4х.241.9Б.17.1008 от 14.02.2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов А.М. // Тезисы докладов XIV Всероссийской конференции “Диагностика высокотемпературной плазмы” ДВП-14, Звенигород 2011.
2. Алексеев А.Г., Белов А.М. // Сб. трудов Отделения физики токамаков-реакторов ФГУП “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”. Троицк, 2012. Вып. 8. С. 36.