

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 004.322

ОРГАНИЗАЦИЯ БЫСТРОГО СБОРА ДАННЫХ И СИНХРОНИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ИТЭР

© 2012 г. С. С. Портоне, Н. Л. Марусов, Е. Ю. Миронова, Е. С. Рогова, И. Б. Семенов

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”
“Проектный центр ИТЭР”*

Россия, 123182, Москва, пл. Курчатова, 1

E-mail: S.Portone@iterrf.ru

Поступила в редакцию 14.07.2011 г.

После доработки 10.11.2011 г.

Описаны основные компоненты системы управления CODAC (Control Data Acquisition and Communication) технологическими процессами установки ИТЭР. Система CODAC демонстрирует современный уровень развития высокопроизводительных измерительных и управляющих систем. Предложено решение по построению стационарных сверхбыстрых измерительных каналов (частота оцифровки ≥ 1 ГГц) в проекте ИТЭР. Рассмотрена организация привязки системы синхронизации измерительных каналов к глобальному времени в проекте ИТЭР.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследования в области управляемого термоядерного синтеза постепенно переходят из стадии исследования физики высокотемпературной плазмы к созданию экспериментальных полупромышленных термоядерных установок. В установках начали использовать тритий, что привело к появлению в составе установок в той или иной мере дополнительных систем ядерного цикла и соответственно систем ядерной безопасности. Помимо этого, установки стали работать в полустационарном режиме, при котором время существования высокотемпературной плазмы стало измеряться десятками минут либо часами. Возросло также число технологических и диагностических систем в составе установок. Установки становятся все более сложными технологическими объектами, управление которыми представляет собой комплексную задачу.

В настоящее время международное термоядерное сообщество приступило к совместному строительству опытного термоядерного реактора ИТЭР (интернациональный термоядерный экспериментальный реактор). Установка строится на юге Франции в атомном центре Кадараш и будет генерировать 1.5 ГВт термоядерной мощности. Физический пуск установки планируется в 2019 г. Оценки показывают, что количество технологических систем будет составлять более 160-ти (что повлечет за собой повышенную сложность системы управления установкой ИТЭР), а количество диагностических измерительных каналов превысит 10^6 .

Диагностические системы установки ИТЭР требуют создания квазистационарных измерительных каналов с частотой оцифровки от не-

скольких мегагерц до 2–5 ГГц и динамическим диапазоном ≥ 12 бит. Такие технические требования находятся вблизи теоретического предела аналого-цифровых преобразователей, что в свою очередь накладывает специальные требования на систему синхронизации. В отличие от импульсных экспериментальных установок, где возможна регистрация большого объема данных в течение короткого времени, установки с продолжительной длительностью эксперимента требуют измерительных каналов, способных производить измерения и on line обработку данных.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ CODAC

Автоматизированная система управления CODAC (Control Data Acquisition and Communication) технологическими процессами установки ИТЭР предназначена для интеграции 160 диагностических и технологических подсистем в единый комплекс. Идеологическая система управления CODAC имеет иерархическую организацию (рис. 1): на верхнем уровне – супервизор, предназначенный для координации общей работы системы; на среднем – система автоматического управления подсистем, которые супервизор “видит” как абстрактные устройства в едином формате посредством интерфейса “Plant System Host”; на нижнем – осуществляется местное управление с помощью программируемых логических контроллеров (PLC) и магистрально-модульных систем. Вертикально система CODAC установки ИТЭР делится на собственно систему управления (CODAC System), систему блокировок и защит (Central Interlock System) и систему

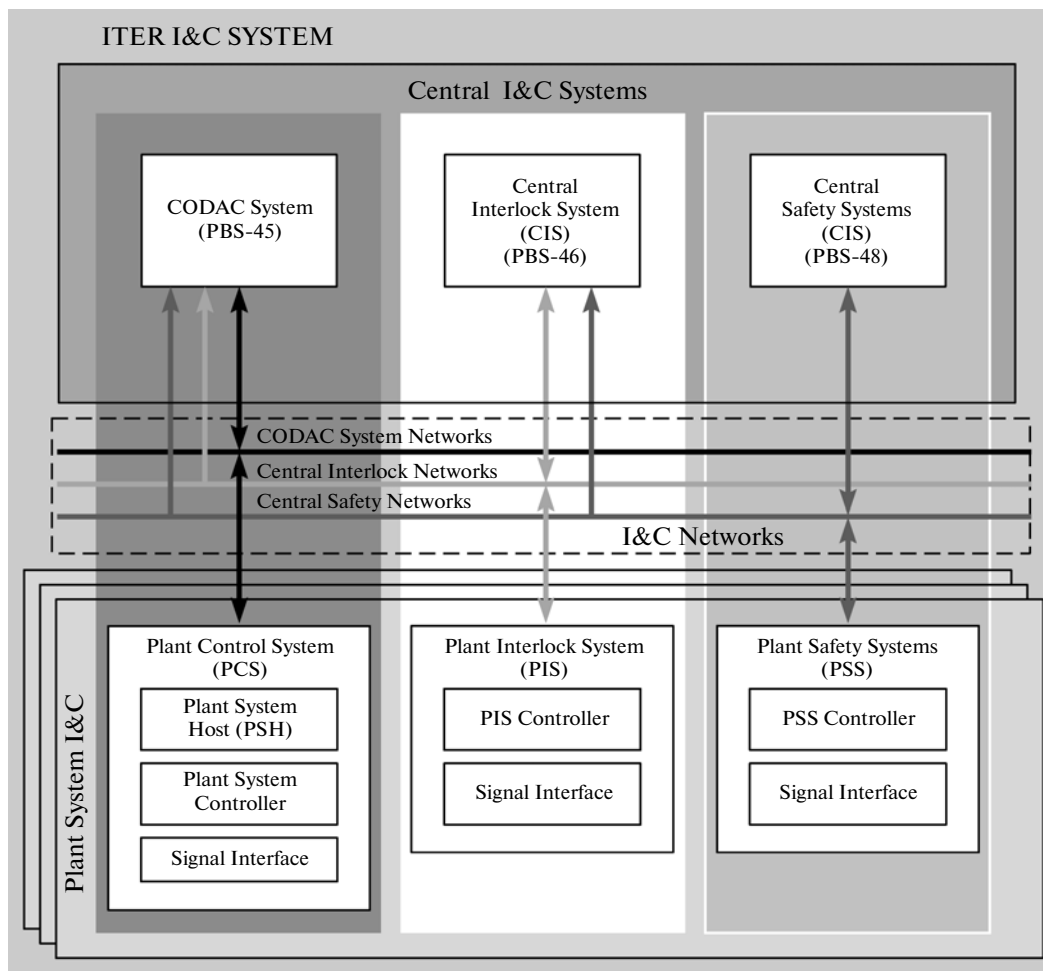


Рис. 1. Структура системы управления установкой ИТЭР.

безопасности, связанную с ядерной частью (Central Safety System).

По практическим соображениям и в связи с технологическими ограничениями было решено аппаратно разделить системы управления подсистем установки ИТЭР на “быструю” и “медленную” части. “Медленное” управление технологическими процессами (характерные времена порядка 1 мс) достаточно хорошо проработано в промышленных приложениях, и этот опыт будет использован в системе CODAC непосредственно. “Быстрое” управление (от нескольких килогерц до нескольких гигагерц) требует эксклюзивного подхода в каждом конкретном случае. В частности, для быстрых каналов обратных связей между подсистемами ИТЭР будут выделены специальные линии связи, модули рефлексивной памяти и вычислительные кластеры. Для “медленной” части центральная команда ИТЭР регламентировала использовать PLC фирмы “Siemens” (серии S7-300 и S7-400). Для “быстрой” части регламентируется использовать магистрально-модульные системы на основе стандарта PXI Express и ATCA.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДСИСТЕМЫ (PLANT SYSTEM)

В связи с большим числом отдельных технологических подсистем Plant System (PS), которых в проекте ИТЭР насчитывается более 160, возник вопрос о построении объединяющей их иерархической архитектуры. Архитектура построения PS выбирается из двух универсальных шаблонов, которые могут быть расширены и приспособлены к требованиям каждой конкретной подсистемы.

Первый шаблон – тесно связанная структура (рис. 2). В подсистеме есть супервизорный контроллер, координирующий работу всех остальных контроллеров подсистемы, которые соединены с технологическим оборудованием. Также в системе находится компьютер Plant System Host (PSH), реализующий интерфейс к PS, интегрируемой в систему CODAC установки. Следует отметить, что для каждой из технологических подсистем возможно наличие только одного PSH.

Второй шаблон – это вариант слабосвязанной структуры (рис. 3). Данный вариант основан на том, что мы разделяем технологическую подсистему

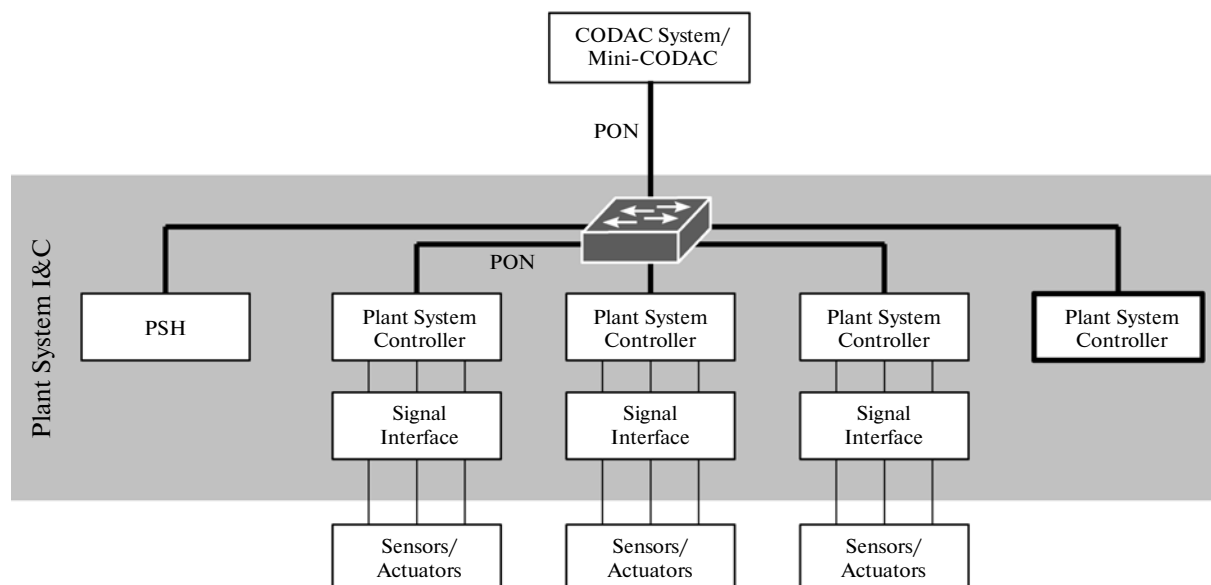


Рис. 2. Тесно связанная архитектура построения технологических подсистем.

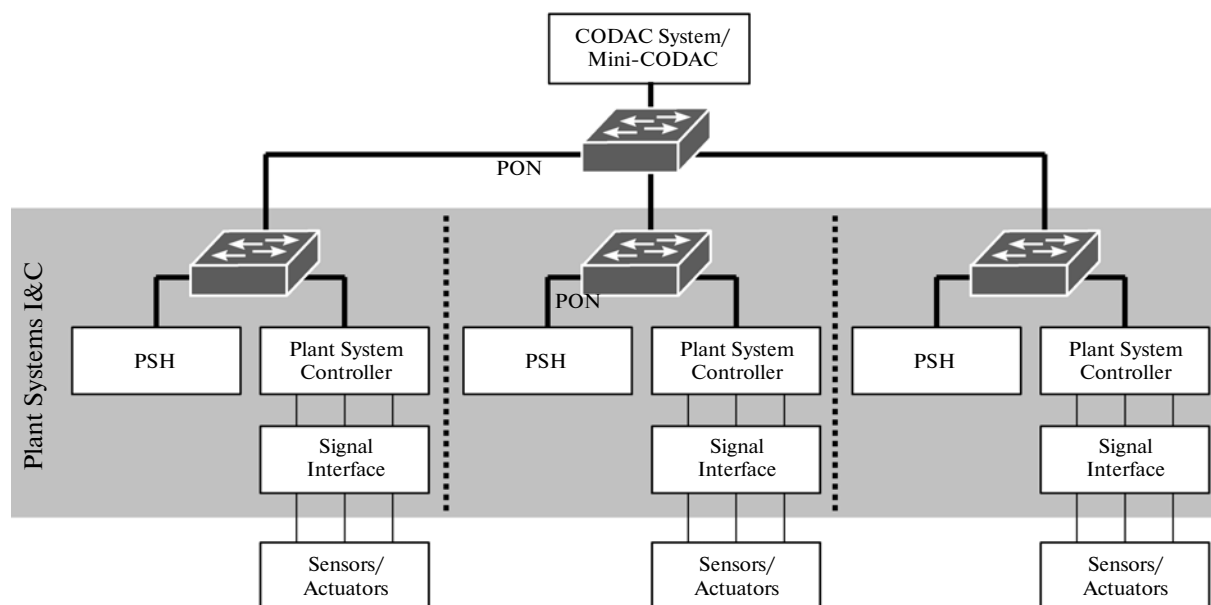


Рис. 3. Слабосвязанная архитектура построения технологических подсистем.

стему на множество подсистем PS I&C (автоматические системы управления и контрольно-измерительные приборы). В каждой подсистеме PS I&C есть свой PSH, в то время как роль supervisory контроллера отведена центральному ядру CODAC.

СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ

Одной из основных функций системы управления CODAC установкой ИТЭР является организация высокоскоростного сбора данных.

Так как в настоящее время некоторые диагностики предъявляют очень высокие требования к измерительным каналам (в особенности к скорости оцифровки и динамическому диапазону), то появилась задача сокращения объемов пересылаемой по каналам связи информации путем ее обработки в режиме реального времени. Это требование, прежде всего, связано с современной пропускной способностью линий передачи данных.

Рассмотрим системы быстрого сбора данных проекта ИТЭР. Общепринятым в рамках проекта стандартом на “быстрые” системы (частота сбора данных варьируется от нескольких килогерц до

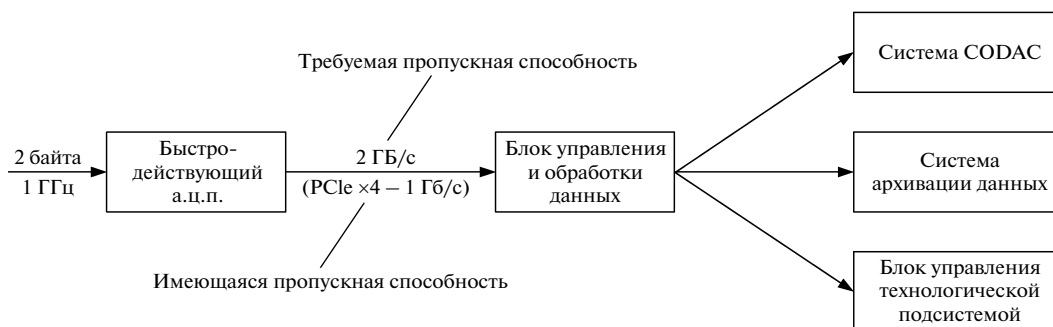


Рис. 4. Упрощенная схема системы сбора данных высокоскоростных диагностик.

нескольких гигагерц) являются магистрально-модульные системы стандарта PXIe. Несмотря на высокопроизводительную шину PXIe (пропускная способность которой составляет 1 Гб/с), не все диагностики способны уложить весь объем собираемой информации в данную пропускную способность.

Примером диагностики, предъявляющей высокие требования к скорости оцифровки и динамическому диапазону, является многоканальная рефлектометрическая диагностика. Она по предварительным подсчетам может собирать данные объемом 2 Б с одного измерительного канала при частоте опроса 1 ГГц. Таким образом, поток информации с одного измерительного канала составит порядка 2 Гб/с, а при требовании одновременного синхронного измерения 30 параметров информационный поток составит около 0.5 Тб/с. В установке ИТЭР насчитывается более десятка подобных диагностических подсистем, что требует построения для них систем сбора с внутренней *on line* обработкой для сокращения объемов передаваемых данных.

На рис. 4 представлена упрощенная схема сбора данных высокоскоростных диагностик. С учетом пропускной способности канала (шины PXIe) 1 Гб/с объем собираемой информации по одному измерительному каналу в данной диагностике составляет 2 Гб/с, что превышает допустимый объем передаваемой по шине информации примерно в 2 раза. Следует учитывать, что особенностью многих диагностик (в том числе и рефлектометрической) является то, что огромные массивы собираемой информации представляют собой “сырые” данные, которые впоследствии обрабатываются специальными методами для уменьшения их объема.

Добиться уменьшения объема передаваемой по шине PXIe информации можно путем размещения в измерительном канале блока обработки информации. Собираемые “сырые” данные будут поступать в блок обработки информации, а после обработки – передаваться по шине PXIe.

Такие блоки можно реализовать на основе программируемой логической интегральной схе-

мы FPGA, обеспечивающей обработку поступающей информации и передачу ее на шину PXIe через соответствующий мост. Исследования на эту тему ведутся в ИЯФ СО РАН, Новосибирск.

При построении многоканальных систем сбора данных представленный подход не дает большого выигрыша в объеме передаваемых данных, хоть и сокращает его значительно. Таким образом, появляется задача обработки данных не только внутри одного канала, но и по всем каналам в рамках одной системы.

Для этого в проекте ИТЭР используются высокопроизводительные вычислительные системы (например, вычислительные системы серии NVIDIA Tesla, построенные на основе графических процессоров), которые обладают производительностью в несколько терафлоп. Схема взаимодействия представлена на рис. 5.

При использовании такого подхода сырые данные, собираемые измерительными системами по многим измерительным каналам, подвергаются обработке в 2 этапа: на первом – обработка данных внутри канала, а на втором – всех каналов в рамках системы. Это позволяет сократить объем передаваемой информации до пропускной способности физических каналов связи.

СИСТЕМА СИНХРОНИЗАЦИИ

Работа установки ИТЭР требует взаимной синхронизации сотен пространственно разнесенных систем с точностью не хуже 50 нс и синхронизации ряда измерительных каналов внутри диагностических систем с точностью ~5–10 пс с абсолютной привязкой к единому координированному времени (UTC), которое является единым временем, принятым в рамках проекта ИТЭР.

Система синхронизации имеет сложную организацию, так как в составе установки есть подсистемы, требующие базовой синхронизации (<10 мс), и подсистемы, требующие очень точной синхронизации (≤50 нс). Эта задача была решена с использованием двух вычислительных сетей: сети синхронизации TCN (Time Communication Network) и рабочей сети установки PON (Plant Operation

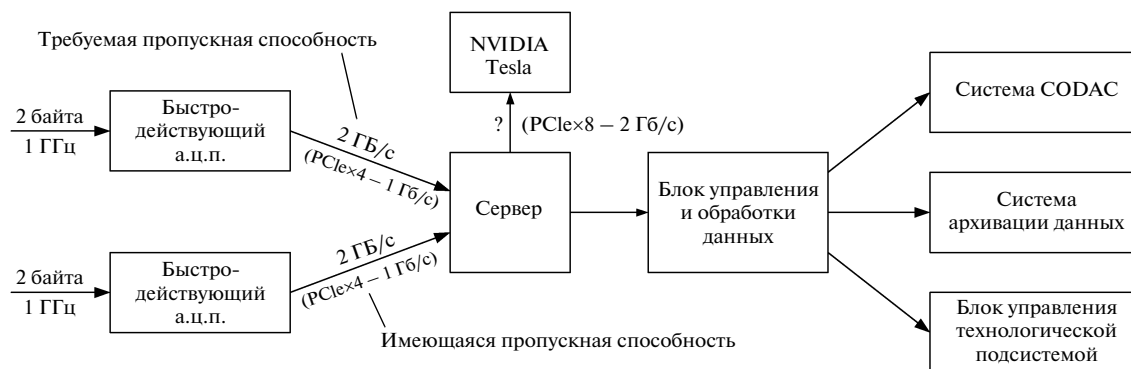


Рис. 5. Упрощенная схема системы сбора данных многоканальных высокоскоростных диагностик.

Network), которые обеспечивают два уровня синхронизации.

Подсистемы, требующие точности синхронизации < 10 мс, должны использовать протокол NTP (Network Time Protocol) по рабочей сети установки PON.

Сеть TCN обеспечивает синхронизацию подсистем установки ИТЭР с точностью не хуже 50 нс. Все подсистемы установки, требующие высокой точности временной синхронизации, должны быть подключены к TCN. Для этого необходимо специальное оборудование и программное обеспечение. Утвержденным стандартом, который обязана поддерживать сеть TCN и устройства, подключенные к ней, является стандарт IEEE 1588 (PTPv2 – Precision Time Protocol version 2).

Основной принцип организации сети TCN заключается в том, что она основана на иерархической структуре Клиент–Сервер. Клиентский порт синхронизирует свое время по серверному порту. Каждый порт, участвующий в процессе синхронизации, должен знать задержки в своей работе и в передаче информации.

Существует две сетевые топологии для организации TCN, основанные на:

1) “Transparent Clocks” (к серверу времени подключены все клиентские узлы для синхронизации) – данный подход плох тем, что при масштабировании сети сервер времени может не справиться с нагрузкой, что повлечет за собой ухудшение точности синхронизации клиентских узлов;

2) “Boundary Clocks” (сервер времени подключен к “пограничным часам” (промышленный роутер, поддерживающий протокол PTPv2), которые, в свою очередь, подключены к другим “пограничным часам” или клиентским узлам) – данный подход хорош тем, что при его использовании сеть легко масштабируется, однако производительность такой сети очень сильно зависит от производительности “пограничных часов”.

Предложенная система синхронизации реализована в рамках стенда мини-CODAC, развернутого в Российском Агентстве ИТЭР. Данный

стенд позволяет моделировать процесс синхронизации частей подсистемы, используя в качестве опорного времени сигнал, получаемый от GPS приемника.

ВЫВОДЫ

Использование описанного подхода при организации системы сбора данных высокоскоростных диагностик позволило достичь значительного уменьшения объема передаваемых данных от системы сбора в ядро системы управления. Такой подход может быть также использован для повышения точности собираемых данных в случае применения его в менее скоростных диагностических комплексах.

Использование отдельной вычислительной сети синхронизации и протокола PTPv2 позволяет синхронизовать географически разрозненные элементы системы с точностью не хуже 50 нс. Таким образом, рассмотренная система синхронизации может применяться в любых технологических системах, предъявляющих высокие требования к синхронности работы подсистем.

Проект ИТЭР является международным, и в создании системы управления установки CODAC принимал участие международный коллектив разработчиков. При разработке данной системы были использованы самые современные методы проектирования и технические средства. Таким образом, систему управления CODAC (которая использует вышеперечисленные подходы к построению систем) следует использовать как универсальную платформу для модернизации уже созданных и при создании новых систем управления, развертываемых на экспериментальных установках в разных областях науки и техники. Использование международного опыта и готовых технических решений позволит значительно снизить затраты на создание систем управления установками на протяжении последующих 10 лет.