

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

УДК 539.12

**РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА СБОРА И АНАЛИЗА ДАННЫХ  
НА ОСНОВЕ ШИНЫ CAN-BUS**

© 2007 г. Д. И. Орехов, А. С. Чепурнов, А. А. Сабельников\*, Д. И. Маймистов

*НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына*

*Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*

*Россия, 119899, Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 2*

*\*РНЦ “Курчатовский институт”, Россия, 123182, Москва, пл. И.В.Курчатова, 1*

Поступила в редакцию 14.08.2006 г.

После доработки 20.12.2006 г.

Распределенная система удаленного контроля больших ядерно-физических установок позволяет осуществлять сбор, хранение и анализ данных, поступающих с детектирующих устройств, и их визуализацию через WEB. Система использует промышленную сеть передачи данных CAN и протокол верхнего уровня DeviceNet. Аппаратная часть представляет собой набор контроллеров, которые преобразуют сигналы детектирующих устройств в частоту и передают их в цифровом виде по сети CAN в хост-компьютер. Программное обеспечение реализует стек протокола DeviceNet, обеспечивающий сбор и транспортировку данных. Пользовательский интерфейс создан на основе динамических WEB-страниц. Их формирование и графическая визуализация данных производится с помощью серверных скриптов. Система используется для контроля темновых шумов ф.э.у. в нейтринном детекторе BOREXINO (Италия).

PACS: 07.05.Dz, 07.05.Hd, 07.05.Kf, 07.05.Rm

**ВВЕДЕНИЕ**

При разработке системы контроля темновых шумов ф.э.у. для большого нейтринного детектора BOREXINO [1] перед нами стоял ряд задач, типичных для любой большой ядерно-физической установки: сбор данных (с последующим сохранением); анализ накопленных данных; управление установкой; поддержание установки в рабочем состоянии.

В основе описываемой системы лежит принцип независимых программных и аппаратных модулей, взаимодействующих посредством стандартных интерфейсов.

Детектор BOREXINO можно отнести к классу больших систем из-за его размеров и количества используемых в нем устройств и подсистем. У него, как и у большинства современных физических установок, можно выделить следующие характерные черты:

– используется большое количество разнообразных датчиков (в нашем случае примерно 2500 детектирующих устройств), состояние которых необходимо контролировать в ходе эксперимента;

– несмотря на тщательный отбор электронных компонентов, существует вероятность их выхода из строя, что может привести к потере данных и искажению результатов эксперимента;

– в процессе эксперимента происходит получение огромного количества разнородных “сырых”

данных, которые позже обрабатываются с целью извлечения “физических” данных; в системе контроля темновых шумов BOREXINO основным исследуемым параметром является частота темнового шума с 2500 ф.э.у., измеряемая один раз в секунду;

– так как процессы сбора и анализа данных разнесены во времени, то собранную и предварительно обработанную информацию необходимо сохранить для дальнейшего анализа.

Анализ полученных данных позволяет решить следующие задачи:

– наблюдение спорадических эффектов и критических неисправностей в отдельных датчиках и в группах датчиков;

– наблюдение коррелированных изменений в группах датчиков;

– оценка долговременных трендов (уменьшение-увеличение, оценка постоянной времени);

– оценка периодических вариаций с использованием фурье-анализа;

– спектральный анализ сигналов с датчиков;

– исследование корреляций исследуемой величины с другими физическими характеристиками (температурой, вибрациями, акустическими шумами, электромагнитными помехами и т.д.).

Детектор BOREXINO представляет собой сложное инженерное сооружение, состоящее из нескольких подсистем, отдельные модули которого

расположены на большой площади. В частности, в системе контроля темновых шумов можно выделить две подсистемы: собственно для детектора и для мюонного вето. Поэтому детектор BOREXINO, как и другие подобные установки, должен иметь встроенные средства контроля функционирования, а также допускать масштабируемость.

Система контроля темновых шумов детектора BOREXINO является вспомогательной и необходима для мониторинга состояния детектора и его готовности для выполнения основной целевой функции по сбору физических данных. Тем не менее, накопленные данные о темновых шумах ф.э.у. могут быть самостоятельным источником физических данных [2, 3].

В коллаборации BOREXINO принимают участие ученые из 19 лабораторий в 8 странах мира. Чтобы обеспечить оперативный доступ к данным для всех участников коллаборации, система должна обеспечивать возможность удаленной работы с данными. Для этого в настоящее время наиболее удобно использовать глобальную сеть Internet, организуя интерактивный доступ к накопленным данным и визуализацию текущего состояния установки при помощи WEB-интерфейса.

Благодаря своей архитектуре созданная система может быть адаптирована для осуществления контроля или сбора данных в других больших физических установках, и поэтому ее можно рассматривать как платформу для построения систем контроля.

В первой части статьи описывается архитектура созданной нами системы контроля сбора и анализа данных. В последней части более подробно рассматриваются особенности конкретной системы контроля для детектора BOREXINO.

## АРХИТЕКТУРА АППАРАТНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ

В промышленных системах, когда требуется организовать сбор данных с многих аналоговых датчиков, наиболее подходят интерфейсы “токовый 4–20 мА” и частотный, в которых аналоговый параметр сразу генерируется или преобразуется в сигнал частоты. Такие физические параметры, как температуру, напряжение, давление несложно преобразовать в частоту, что обеспечит удобство при передаче сигнала для дальнейшей обработки. При передаче сигнала в частотной форме технически проще и дешевле обеспечить гальваническую развязку, необходимую при многоканальном сборе данных в больших распределенных системах. Таким образом, универсальным входным преобразователем в предлагаемом архитектурном решении является модуль, имеющий несколько входов для измерения частоты. Модули объединяются промышленной сетью свя-

зи, обеспечивая возможность построения иерархической распределенной системы и приближения первичных преобразователей к датчикам с частотным выходом.

Для связи модулей нашей системы из множества существующих промышленных сетей была выбрана шина CAN (Controller Area Network). В силу своих особенностей – побитовый арбитраж, дифференциальный режим передачи сигналов, высоконадежный алгоритм обработки и фиксации ошибок – промышленная сеть CAN хорошо подходит для создания распределенных систем сбора данных, контроля и управления. Шина CAN-bus характеризуется высокими скоростью передачи данных (до 1М бит/с) и помехоустойчивостью. Гибкость CAN достигается за счет простого подключения и отключения от шины CAN-модулей, причем общее число модулей протоколом нижнего уровня не ограничено.

Современный стандарт CAN 2.0B [4] описывает только два нижних уровня эталонной сетевой модели ISO/OSI [5]: физический и канальный. Для построения системы передачи данных требуется применение того или иного протокола верхнего (прикладного) уровня, в качестве которого удобно использовать протоколы DeviceNet или CanOpen, поскольку они имеют открытую спецификацию, и для них разработаны и поддерживаются соответствующие международные стандарты. В реализованной нами системе контроля темновых шумов BOREXINO используется протокол DeviceNet [6].

Архитектурной особенностью системы является возможность разделения системы сбора данных на произвольное число независимых подсистем. В каждой из этих подсистем может измеряться до 256 каналов частоты с помощью нескольких независимых контроллеров-частотомеров, связь между которыми происходит по протоколу DeviceNet. При этом контроллеры для каждой из подсистем могут иметь различные технические характеристики (канальность, диапазон измеряемых частот) в зависимости от конкретной физической задачи, но при этом имеют общую архитектуру и одинаковое представление в системе. В настоящее время используются частотомеры на 8, 16 и 64 канала. Предполагается, что к одному модулю подключаются датчики, территориально расположенные в одной области контролируемой установки.

Каждый из частотомеров имеет CAN-контроллер и подключен к сети CAN в качестве slave-устройства. Master-устройством является управляющий компьютер подсистемы сбора данных. Каждая подсистема контроллеров представляет собой независимую сеть CAN. Данные от управляющего компьютера поступают на сервер, где они хранятся и выдаются по запросам клиентских станций.

При разработке системы предполагалось измерение относительно медленно изменяющихся данных, т.е. характерное время изменения контролируемого параметра не должно быть менее 1 с. Измеряемое значение частоты при этом может лежать в диапазоне 10 Гц – 0.5 МГц. Частота измеряется с точностью 1 Гц в средней части рабочего диапазона, на границах этого диапазона погрешность  $\leq 10\%$ .

Для измерения физических параметров, отличных от частоты, в систему могут быть добавлены стандартные модули-преобразователи, соединенные по шине CAN-bus. Расширение системы дополнительными модулями обеспечивается за счет применения стандартных протоколов верхнего уровня сети CAN-bus.

Созданная нами система реализует все уровни классической трехуровневой системы управления и сбора данных [7]: уровень доступа к объекту; уровень станций управления; сервисный уровень для поддержания графического интерфейса.

Именно такая архитектура наилучшим образом подходит для распределенных и больших систем. Кроме того, она позволяет масштабировать и адаптировать систему сбора данных к различным большим физическим установкам. Использование независимых друг от друга групп контроллеров позволяет логически группировать датчики по географическому или функциональному признаку, поэтому систему можно рассматривать как платформу для построения аналогичных систем.

## АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ

Рассмотрим общую схему программного обеспечения системы для случая двух подсистем контроллеров (рис. 1).

Программное обеспечение системы контроля, сбора и анализа данных построено по многоуровневой схеме, в частности, в нем можно выделить четыре уровня: аппаратный; уровни сбора, обработки, отображения данных;

Кроме того, в программном обеспечении можно выделить шесть функциональных подсистем: сбора данных; имитации физических данных; обработки данных; сохранения данных; контроля состояния (визуализации); off line-анализа.

На рис. 2 и 3 показаны структуры подсистем сбора и обработки данных, соответственно. При этом управляющие программы для каждой из подсистем частотомеров могут находиться как на одной, так и на разных э.в.м.

Для передачи данных между уровнями системы используются две клиент-серверные связки. Одна находится между уровнем сбора данных, где сервером является TCP/IP Daemon, и уровнем обработки данных, где клиентом является программ-

ный модуль Dataserver. Вторая – между уровнем обработки данных, где сервером является модуль Dataserver, и уровнем отображения данных, где клиентом является подсистема визуализации.

Обмен данными клиент-сервер происходит с использованием стандартного механизма сокетов по принципу запрос-ответ.

На рис. 1 видно, что уровни сбора, обработки и отображения данных физически разделены и находятся на разных компьютерах, ввиду неоднородности задач, выполняемых системой, из-за разделения во времени процессов накопления и анализа данных, а также для балансировки нагрузки на компоненты.

Рассмотрим схему работы и взаимосвязь различных модулей системы.

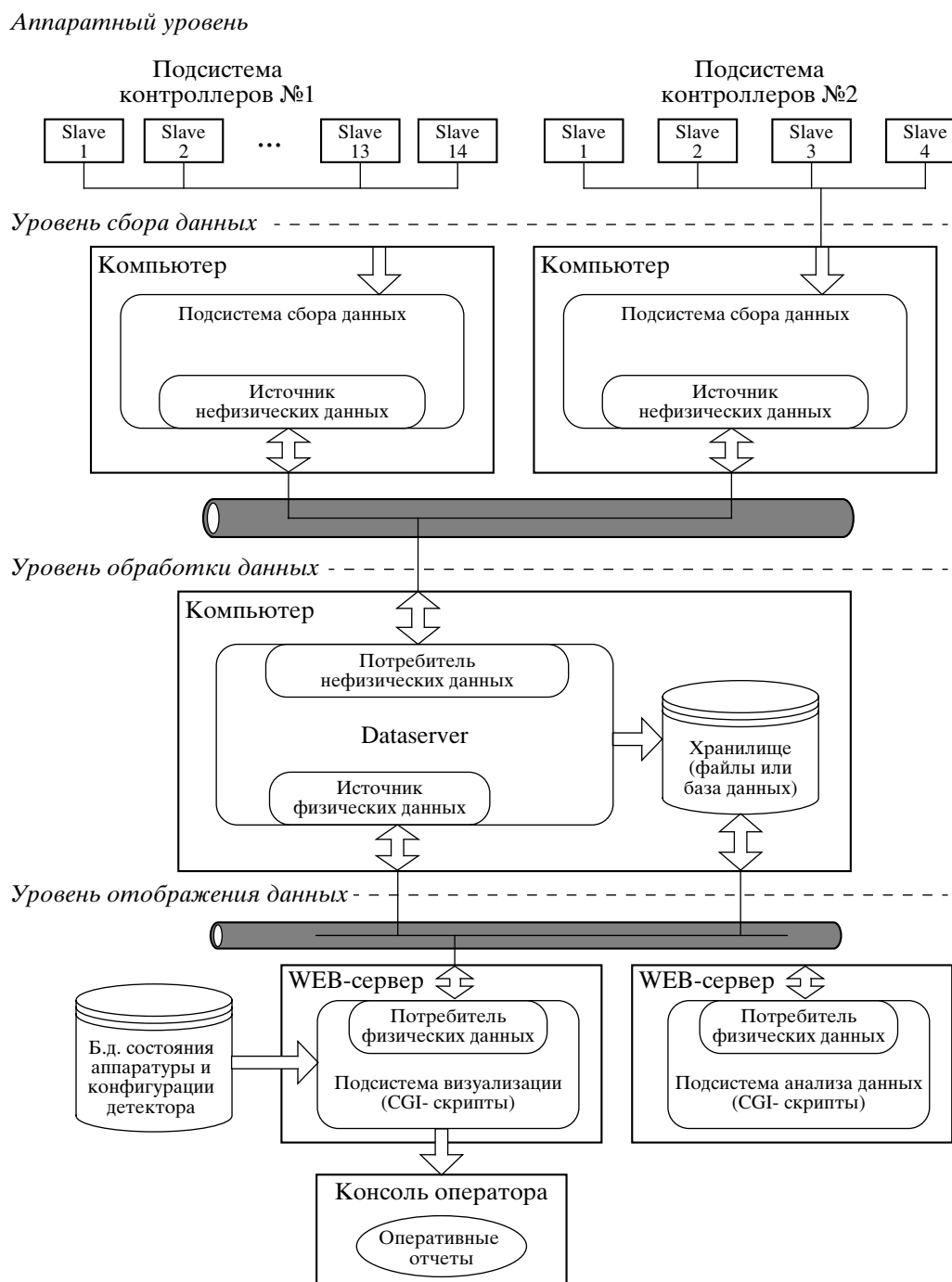
В режиме сбора данных информация о контролируемых параметрах поступает от множества различных датчиков, сгруппированных посредством нескольких измерительных модулей и объединенных сетью CAN. Следовательно, подсистема сбора данных является распределенной.

Эти данные через модуль сбора данных (DeviceNet Master) записываются в область распределенной памяти. Если установка находится не в рабочем режиме, т.е. система распределенных контроллеров выключена, то в область распределенной памяти данные могут поступать от модуля имитации.

Модуль имитации предназначен для отладки системы. Он позволяет смоделировать редкие и аварийные состояния установки, т.е. служит для проверки адекватности поведения системы контроля. При старте модуля имитации происходит проверка на то, функционирует ли основная система сбора данных, и только если она выключена, происходит запись имитируемых данных в область распределенной памяти. Интерфейсная часть системы имитации позволяет в реальном времени задавать поведение каждого из имитируемых каналов через удобный графический интерфейс.

Из области распределенной памяти данные забираются модулем передачи данных (TCP/IP Daemon), который выдает их по запросам модулю обработки данных (Dataserver). Модуль передачи данных может выдавать данные как от каждой подсистемы частотомеров в отдельности, так и от всех работающих подсистем одновременно. Запрос данных происходит по таймеру, период опроса ( $T_1 = 0.5$  с) равен  $1/2$  характерного времени поступления данных ( $T_2 = 1$  с).

Модуль обработки данных реализует функцию упаковки данных в базу данных (б.д.) и осуществляет временное хранение данных о частотах. Область временного хранения организована в виде кольцевого буфера, позволяющего реализовать режим скользящего временного окна в модуле визуализации. Размер буфера может быть



**Рис. 1.** Структурная схема программного обеспечения системы контроля.

настроен в зависимости от необходимой длины предыстории, запрашиваемой модулем визуализации. Подсистема упаковки данных в б.д. производит первичную обработку данных, привязку их к абсолютному времени, по возможности их сжатие и в структурированном виде упаковку в б.д. Данные, полученные в нефизическом формате, перед сохранением и передачей WEB-клиентам преобразуются в физическую форму: в частоту,

температуру, напряжение. Сохранение данных осуществляется периодически в течение работы программы, а в тестовом режиме при необходимости может быть отключено.

Dataserver, подсистемы сбора и имитации данных написаны на языке ANSI C для использования в операционной системе Linux.

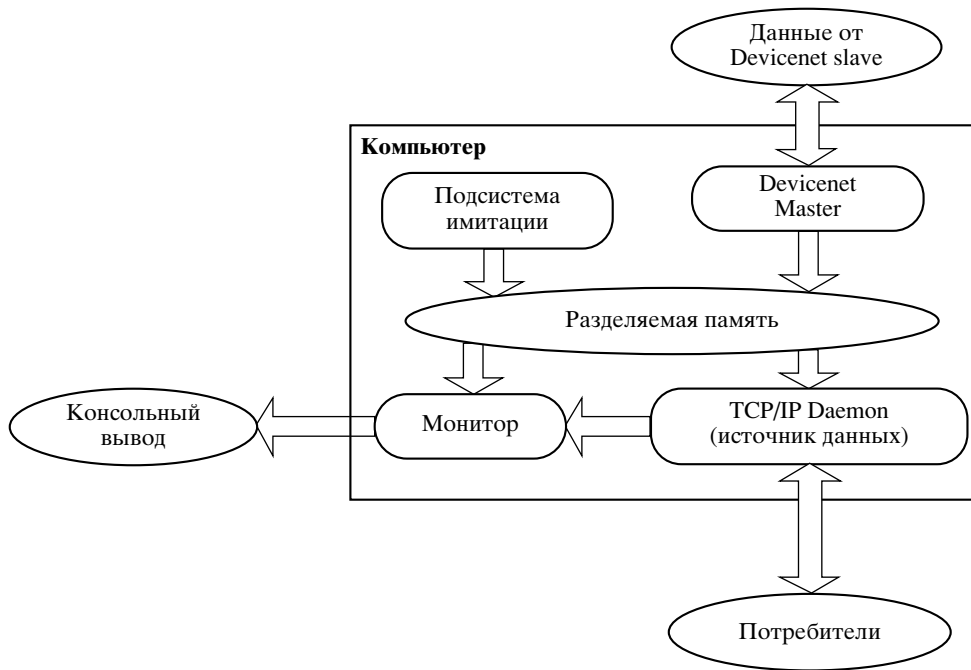


Рис. 2. Структура подсистемы сбора данных.

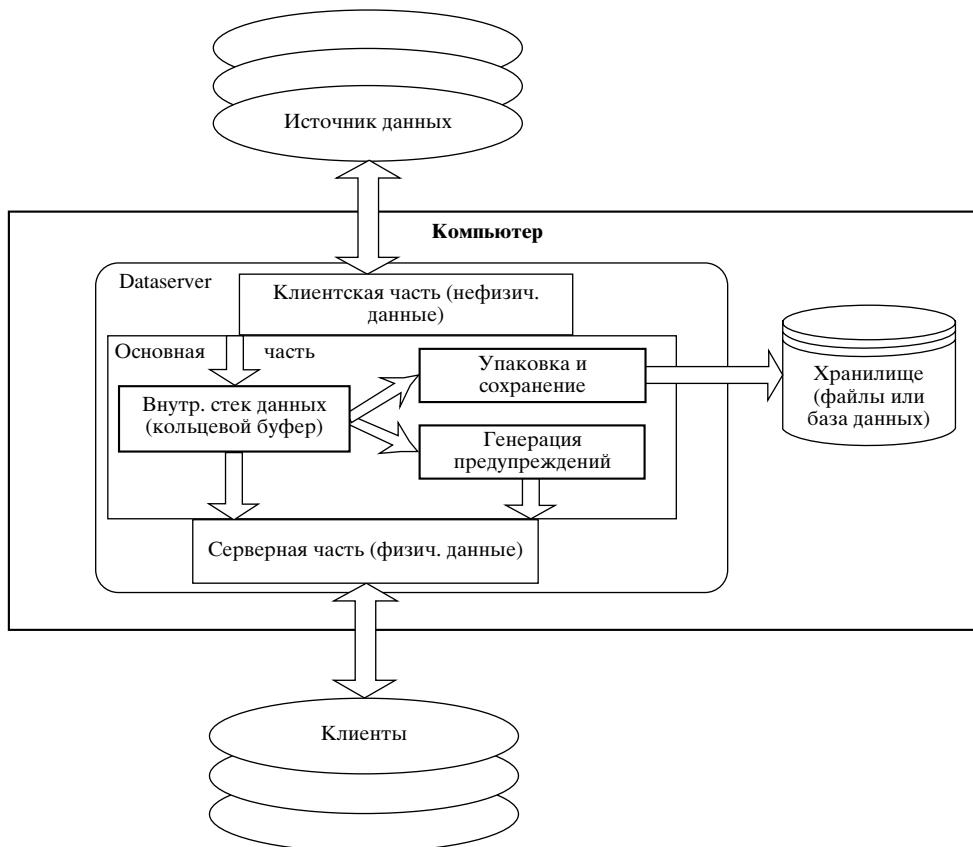


Рис. 3. Структура подсистемы обработки данных.

Модуль визуализации данных в реальном времени отображает данные по частотам в каналах частотомеров. Данная подсистема отображает состояния всех каналов и устройств, делая при этом запрос в б.д. состояния аппаратуры, уточняющий соответствие канала частотомера и реального физического устройства.

Модуль анализа данных генерирует запросы к системе управления базой данных (с.у.б.д.) для получения информации о контролируемой величине за определенный период времени. Модули визуализации и анализа данных написаны с использованием CGI-скриптов на языках Perl и PHP.

#### *Подсистема сохранения данных*

Проектное количество каналов частоты в одной подсистеме частотомеров равно 256. Каждая единица данных при этом занимает при хранении 10 байт: 4 байта – значение частоты, 4 байта – временная метка, 1 байт – номер канала и 1 байт – формат данных. Большая длина записи необходима ввиду потенциальной неравномерности поступления данных. Выбранный способ хранения обеспечивает полное восстановление временной картины событий в наблюдаемом устройстве.

Таким образом, при сборе данных с периодом 1 запрос/с поток данных равен ~2.5К байт/с, что в пересчете на день работы составляет ~211 М байт, в год – ~76Г байт, а за 10 лет непрерывной работы детектора – ~0.75Т байт. Нужно отметить, что в зависимости от скорости изменения исследуемых физических параметров минимальный интервал для сохраненных данных может быть увеличен в  $N$  раз, что в  $N$  раз уменьшит общий объем данных.

Оценка показывает, что данные от одной подсистемы контроллеров можно хранить на одном сервере баз данных, расположенных на одном носителе, состоящем из нескольких современных жестких дисков.

Применение реляционной с.у.б.д. для хранения данных позволяет упростить выборку данных для анализа, используя стандартизированный язык запросов ANSI SQL. Кроме того, гибкость и богатые возможности SQL по сортировке, группировке и выборке данных обеспечивают все потенциальные потребности при разработке подсистемы анализа.

В качестве конкретной с.у.б.д. выбрана PostgreSQL [8]. При выборе с.у.б.д. основными факторами были ее надежность, поддержка целостности данных, кроссплатформенная реализация с.у.б.д., наличие интерфейсов доступа для основных языков программирования, распространенность, реализация контроля доступа к данным, полнота поддержки стандартов ANSI SQL, скорость обработки данных и бесплатность.

#### *Подсистема контроля состояния*

Подсистема визуализации данных в реальном времени используется как для технологической отладки, так и для контроля состояния установки оператором, а также для анализа аварийных или непонятных событий в работе установки. Для правильной интерпретации данных подсистема имеет доступ к базе данных состояния аппаратуры и конфигурации устройств с целью детектирования состояния, когда отдельный датчик отключен или отсутствует. Визуализация данных осуществляется через WEB-интерфейс.

Основной экранной формой в подсистеме визуализации является экран контроля состояния каналов подсистемы частотомеров, примерный вид которого изображен на рис. 4. Такая форма предоставляет возможность доступа к каждому индивидуальному каналу, к его предыстории и к вычисленным параметрам статистического распределения (среднее за период и дисперсия) на основе заданной длины предыстории (последняя, как и другие параметры подсистемы, задается на специальном экране настроек). При отображении предыстории возможно усреднение исследуемого параметра за некий настраиваемый промежуток времени данных. Также предусмотрена область для отображения данных из б.д. состояния аппаратуры, относящихся к каналу, например, его расположение на общей схеме установки.

Кроме того, в системе реализован режим скользящего окна, в котором отображается предыстория среднего значения частоты подсистемы частотомеров (как усредненное значение по всем каналам всех устройств за некое время усреднения). Режим позволяет отслеживать значительное изменение частоты в группах датчиков. Длина предыстории и время усреднения также настраиваются.

Благодаря использованию многоуровневой архитектуры программного обеспечения и организации динамической генерации WEB-страниц, как наиболее удобного механизма отображения данных, возможно одновременное обслуживание через сеть Internet большого количества запросов на получение и визуализацию собранных данных.

### ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ, СБОРА И АНАЛИЗА ДАННЫХ В ДЕТЕКТОРЕ BOREXINO

BOREXINO – детектор нейтрино низких энергий (0.86 МэВ) – находится в подземной лаборатории Гран Сассо, Италия (LNGS) [9]. В настоящее время его сооружение практически закончено. Основной целью эксперимента является прямое измерение потока “бериллиевых” солнечных нейтрино в режиме реального времени. Детектор состоит из двух частей, условно называемых внутренним и



Рис. 4. Пример экрана контроля состояния каналов (channel) для одной подсистемы (Inner Detector) частотомеров (rack).

внешним детекторами (внешний детектор реализует систему мюонного вето).

Особенностью детектирования нейтрино низких энергий является малочисленность исследуемых событий. Например, ожидаемая частота регистрации нейтрино в BOREXINO составляет 0.1–0.5 событий/день на тонну вещества детектора. Поэтому критически важно поддерживать низкий уровень фона в детекторе. Необходимую светимость при детектировании “бериллиевых” нейтрино позволяет обеспечить только сцинтилляционный детектор, работающий в однофотоэлектронном режиме, ввиду малых энергий образующихся в нем частиц ф.э.у.

Характерной особенностью любого ф.э.у. являются темновые шумы. Темновые шумы – это ток (сумма импульсов в однофотоэлектронном режиме) на выходе ф.э.у., возникающий при попадании фотона на фотокатод. При определенных условиях темновые шумы ф.э.у. способны искажать физическую картину и даже сделать эффективную работу детектора невозможной. Поэтому контроль частоты темновых импульсов ф.э.у. является важной задачей для обеспечения работоспособности детектора.

Структура системы контроля темновых шумов ф.э.у. определяется структурой самого детектора BOREXINO и, исходя из этого, разделяется на две независимые подсистемы, условно названные внешняя и внутренняя.

Внутренняя подсистема контролирует суммарный темновый шум от группы из 12 ф.э.у. для всех 2300 ф.э.у. внутреннего детектора. Такая группировка связана с особенностью конструкции электроники детектора и является достаточной для отслеживания общего состояния темновых шумов всего внутреннего детектора. Внутренняя система содержит 14 модулей-частотомеров по 16 каналов в каждом, причем из 16 каналов одновременно в работе находятся только 14. Еще два канала являются резервными на случай возникновения неисправностей. Таким образом, всего от системы поступает 196 независимых потоков данных.

Внешняя подсистема отслеживает уровень темновых шумов для каждого из 256 ф.э.у. мюонного вето. Внешняя система контроллеров состоит из 4 частотомеров, по 64 канала в каждом. Итого имеется 256 каналов, каждый из которых имеет смысл частоты темнового шума от одного ф.э.у.

Данные поступают с частотой 1 Гц, контролируемое значение частоты может находиться в диапазоне 10–500 кГц.

Разработанное аппаратное и программное обеспечение пущено в тестовую эксплуатацию осенью 2004 г. в составе системы сбора данных детектора BOREXINO.

### ВЫВОД

Разработанные нами программные и аппаратные компоненты образуют законченную платформу для построения систем контроля, сбора и анализа данных. Созданные на ее основе системы способны обеспечить оперативный контроль над большой ядерно-физической установкой, в том числе своевременную реакцию на возникновение неисправностей оборудования. Структура платформы позволяет легко масштабировать, модернизировать и расширять функциональные возможности созданных на ее основе систем. Опыт использования системы контроля темновых шумов детектора BOREXINO позволяет рассматривать платформу как основу для построения распределенных систем контроля в режиме реального времени для больших физических установок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орехов Д.И., Чепурнов А.С., Сабельников А.А. и др. Препринт 2006–10/809. М.: НИИЯФ МГУ, 2006.
2. Сабельников А.А., Чепурнов А.С. Препринт ИАЭ-6305/15. М.: РНЦ “Курчатовский институт”, 2003.
3. Chepurnov A.S., Nedeoglo F.N., Etenko A.V., Sabelnikov A.A. // *Probl. Atomic Scien. and Technology. Ser: Nucl. Phys. Investigations.* 2004. V. 43. № 2. P. 75.
4. CAN Specification 2.0B. Robert Bosch GmbH, Postfach 30 02 40, D-70442 Stuttgart, 1991. <http://www.semiconductors.bosch.de/pdf/can2spec.pdf>
5. ISO/IEC 7498-1:1994. Information technology – Open Systems Interconnection – Basic reference model: The basic model. International Organization for Standardization, 1994.
6. Chepurnov A.S., Komissarov D.V., Nedeoglo F.N., Nikolaev A.S. // *Proc. ICALEPCS'99. Trieste, Italy.* ISBN: 88-87992-00-2. 1999. P. 388.
7. Грибов И.В., Шведунов И.В., Яйляин В.Р. // ПТЭ. 2003. № 5. С. 26.
8. *PostgreSQL Documentation.* PostgreSQL Global Development Group, 2006. <http://www.postgresql.org/docs/>
9. *Borexino Collaboration*//*Astroparticle Phys.* 2002. V. 16. P. 205.