



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2018–6

С.И. Букреева, А.Н. Васильев, Ю.М. Гончаренко,
А.А. Деревщиков, Е.В. Маслова, Ю.М. Мельник, А.П. Мещанин,
В.В. Мочалов, С.В. Рыжиков, А.В. Рязанцев, П.А. Семенов,
В.А. Сенько, Н.А. Шаланда

**Распределенная система управления детекторами
эксперимента СПАСЧАРМ**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2018

Аннотация

Букреева С.И. и др. Распределенная система управления детекторами эксперимента СПАСЧАРМ: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2018–6. – Протвино, 2018. – 19 с., 8 рис., библиогр.: 20.

В статье описывается система управления детекторами экспериментальной установки СПАСЧАРМ, создаваемой на ускорительном комплексе У-70 (г. Протвино). Рассмотрены общая концепция построения системы управления, пример использования программного обеспечения EPICS, а также описаны электронные узлы системы управления, введенные в эксплуатацию на установке к настоящему времени.

Abstract

Bukreeva S.I. et al. Distributed detector control system for the SPASCHARM experiment: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2018–6. – Protvino, 2018. – p. 19, figs. 8, refs.: 20.

SPASCHARM (SPin ASymmetry in CHARMonia formation) is a new scientific experiment on accelerator complex U-70 (Protvino). The article describes the detector control system of the SPASCHARM experimental setup: general concept of control system development, example of using EPICS software, developed and installed electronic modules of the system.

Введение

Проект СПАСЧАРМ (СПиновые АСимметрии в образовании ЧАРМония) является новым перспективным научным экспериментом для исследования спиновой структуры нуклона и спиновой зависимости сильного взаимодействия антивещества и вещества с материей при энергиях до 50 ГэВ. Экспериментальная установка СПАСЧАРМ создается на крупнейшем российском ускорителе У-70 на базе НИЦ «Курчатовский институт» – Институт физики высоких энергий.

В проекте СПАСЧАРМ есть две стадии: стадия 1 на существующем канале №14 ускорителя У-70 (СПАСЧАРМ-1) и стадия 2 на будущем канале №24А с поляризованными протонным и антипротонным пучками (СПАСЧАРМ-2). В данной статье описывается система управления для существующих узлов установки СПАСЧАРМ-1.

При создании экспериментальной установки, состоящей из десятка разных детекторов и тысяч каналов регистрации, важно разработать удобную в эксплуатации и отказоустойчивую систему управления детекторами (систему медленного контроля), которая обеспечит контроль и доступ к управлению параметрами детекторов и подсистем установки, а также будет служить для своевременного обнаружения сбоев в работе установки и сигнализации о неисправностях. Кроме того, для крупных физических установок принципиально создавать гибкую и легко масштабируемую систему управления.

К настоящему времени на рынке электронных компонентов появилось большое разнообразие высокопроизводительных микропроцессоров и систем на их основе, которые помимо прочих достоинств (универсальность применения за счет широкой встроенной периферии, постоянное развитие и расширение программных средств для

программирования и отладки) имеют относительно невысокую стоимость и большую доступность на рынке. Благодаря этому применение микропроцессорных систем набирает популярность и в научном оборудовании. В данной статье рассматривается система управления детекторами СПАСЧАРМ-1, в разработке которой применение современной микропроцессорной базы сочетается с программным комплексом EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) [1], уже ставшим стандартом программного обеспечения на крупных международных научных установках.

Описание экспериментальной установки и задачи системы управления

Экспериментальная установка СПАСЧАРМ в стадии 1 на существующем канале №14 ускорителя У-70 состоит из следующих основных узлов:

- пучковая аппаратура;
- комплекс поперечно-поляризованной мишени с магнитом Динозавр;
- вето-система;
- спектрометр, состоящий из широкоапертурного магнита М31, шести плоскостей пропорциональных камер и четырех станций дрейфовых трубок с общим числом плоскостей 39 и каналов регистрирующей электроники около 2200;
- электромагнитный калориметр из свинцового стекла на 720 каналов.

Пучковая аппаратура представляет собой набор детекторов, расположенных по оси пучка до мишени установки, а также счетчик частиц, которые не провзаимодействовали с веществом мишени, расположенный после всех трековых детекторов установки. Она предназначена как для выработки первичного триггера, так и для определения типа частицы и её координаты на мишени установки при обработке данных. Для более точного определения координаты частицы вблизи мишени используется сцинтилляционный волоконный годоскоп на основе волокон SCSF-38 фирмы Kuraray, свободные концы которых зафиксированы на фотокатодах 12-и фотоумножителей Hamamatsu R7600-200-M16 [2]. Аналоговые сигналы с анодов преобразуются в цифровые с помощью дискриминаторов с низким порогом и парафазными выходами в стандарте LVDS для передачи к системе сбора данных.

Спектрометрический магнит М31 изготовлен в ИФВЭ. Основной особенностью магнита является большая апертура, позволяющая проводить исследования в большом телесном угле, таким образом, обеспечивать большую апертуру экспериментальной установки в целом. Фотография спектрометрического магнита на канале №14 приведена на рис. 1. Апертура (окно) магнита имеет размеры 2300×1000 мм², толщина обратного магнитопровода составляет 850 мм, однако, из-за неоднородности поля реальная рабочая ширина магнита составляет 1400 мм. Для экранировки рассеянного поля установлены магнитные экраны толщиной 100 мм, на расстоянии 800 мм от центра магнита, немного уменьшающие апертуру, однако практически не искажающие аксептанс установки.



Рис. 1. Фотография спектрометрического магнита М31 на канале №14.

Для оценки характеристик экспериментальной установки были проведены расчеты магнитного поля. На рис. 2 показана нагрузочная кривая, т.е. зависимость индукции магнитного поля в центре магнита от приложенной нагрузки – значения тока в каждом витке. В условиях имеющегося источника питания магнита рабочий ток не превышает 2300 А. При этом падение напряжения на обмотках порядка 150 В (потребляемая мощность магнита ~ 350 кВт).

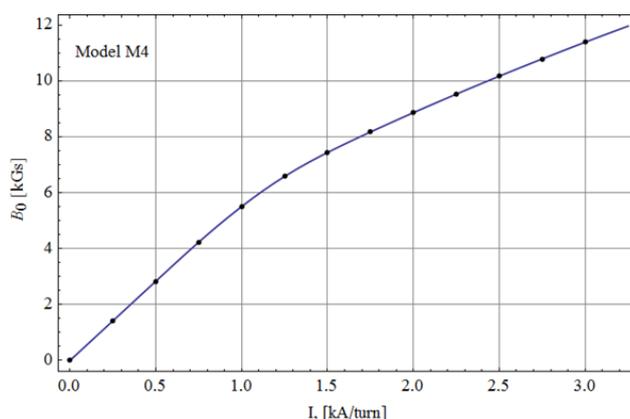


Рис. 2. Нагрузочная кривая для модели спектрометрического магнита М31.

Интеграл поля в центре магнита составит 1,5 Тл·м, однако поле неоднородно. Планируются измерения подробной карты магнитного поля при нескольких значениях тока в магните.

Для отвода тепла, выделяемого при работе магнита, через обмотку прокачивается обессоленная холодная вода под давлением 11 атмосфер.

Перед магнитом располагаются шесть плоскостей пропорциональных камер с шагом проволок 1 мм и первая станция дрейфовых трубок, состоящая из четырех плоскостей – X, Y, а также U и V (которые повернуты на угол 15° относительно горизонтали и вертикали). Эти дрейфовые камеры, как и все остальные камеры за магнитом, изготовлены из майларовых дрейфовых трубок с диаметром 30 мм [3]. Станции, расположенные за магнитом, измеряют три координаты (восстанавливают треки) частиц – X, Y и U.

К дрейфовым трубкам подключаются более 300 8-канальных усилителей сигналов. Данные усилители имеют отдельные входы для управления пороговыми напряжениями. Во время настройки и работы трековой системы появляется необходимость удаленного управления этими напряжениями и тестирования сигналов с усилителей. Реализация таких функций является одной из задач системы управления детекторами установки. Аналогичные усилители используются также и в волоконном годоскопе.

Изготовленный в ИФВЭ магнит **М29 (Динозавр)** для **поперечно-поляризованной мишени** имеет телесный угол раскрытия 250 мрад по вертикали. Магнит представлен на рис. 3. Поле в сомкнутом состоянии магнита может достигать

25 кГц. Однако, по температурным соображениям выбрано рабочее поле 24 кГц для накачки поляризации методом Электронного Парамагнитного Резонанса при частоте близкой к 70 ГГц. При этом рабочий ток составляет 1440 А. Падение напряжения на обмотках порядка 200 В (потребляемая мощность магнита не более 300 кВт). Это «теплый» магнит с пермендюрowymi полюсами (насыщение поля происходит при 25 кГц). Однородность магнитного поля внутри рабочего объема мишени диаметром 20 мм и длиной 200 мм составляет $\pm 10^{-4}$. Для набора статистики при раздвинутых полюсах на 250 мм удерживающее поляризацию мишени поле магнита составляет 4 кГц. Для охлаждения магнита используется обессоленная вода под давлением 21 атм.

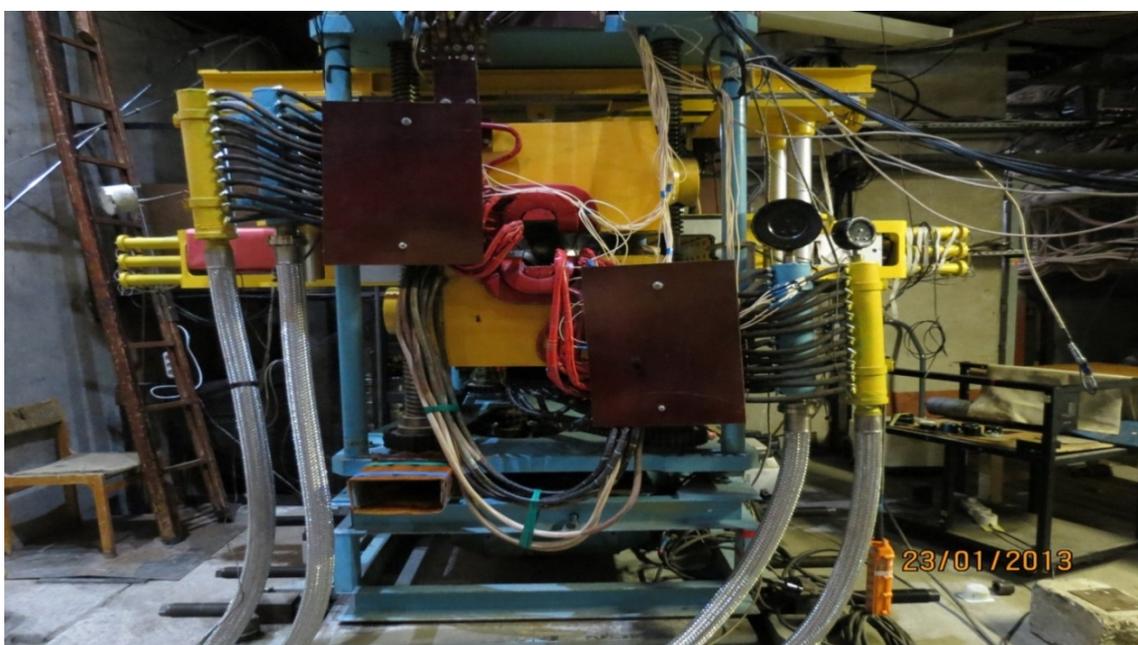


Рис. 3. Магнит поляризованной мишени М29 (Динозавр).

Оба магнита Динозавр и М31 требуют непрерывного отслеживания температуры воды в обмотках и влажности вблизи установки, что позволяет своевременно обнаруживать неисправности в системе охлаждения магнита. При этом контролировать температуру необходимо в каждой обмотке отдельно, т.к. перегрев хотя бы одной обмотки магнита приведет к аварийной ситуации. Кроме этого, нужно измерять падение напряжения на шунтах магнитов и формировать сигнал аварийного отключения магнитов в местный блок управления работой магнитов.

Вето-система является частью поперечно-поляризованной мишени и представляет собой детектор заряженных частиц и гамма-квантов, рождающихся в поляризованной мишени и вылетающих из неё под большими углами, не попадая в открытый телесный угол, определяемый апертурой экспериментальной установки.

Для регистрации заряженных частиц используется первый слой детектора, состоящий из четырех пластин сцинтиллятора (полистирол) вокруг мишени. Свет из каждой пластины собирается спектросмещающими оптическими волокнами, приходящими на фотокатоды двух ФЭУ-84-3, сигналы от которых используются в совпадениях для подавления шумов.

Дальнейшая структура вето-системы в направлениях, перпендикулярных пучку, представляет собой чередование четырех слоев свинца толщиной 7 мм и четырех слоев сцинтилляционных пластин толщиной 5 мм со сбором сигналов также посредством спектросмещающих волокон. Эта часть детектора регистрирует γ -кванты. В каждом модуле сигнал от γ -квантов регистрируется двумя ФЭУ-84-3 в совпадениях. Таким образом, вето-система регистрирует заряженные частицы в четырех и нейтральные в двух интервалах по азимутальному углу φ . Вето-система может быть использована для формирования триггера при измерении эксклюзивных реакций.

В каналах вето-системы используются генераторы Кокрофт-Уолтона, задающие напряжения динодов ФЭУ. Для управления входными напряжениями на самих генераторах нужна система управления, которая, кроме того, должна обеспечивать обратную связь с генераторов и мониторировать потребление тока в каналах для быстрого поиска неисправностей.

Система сбора данных СПАСЧАРМ на основе модулей электроники в стандарте ЕвроМИСС [4] позволит регистрировать до 50 тысяч событий за сброс с растяжкой пучка частиц 2 секунды. Регистрирующая электроника (ВЦП, АЦП, регистры, счетчики) в стандарте ЕвроМИСС разработана в отделе электроники ИФВЭ. Протокол передачи позволяет передавать по шине 16-битные данные одновременно с адресной информацией за цикл 100-200 нс в зависимости от типа модуля.

В настоящее время в сеансе на установке для регистрации сигналов используются 15 модулей зарядовых АЦП (общее количество каналов – 720) для чтения калориметра,

20 модулей ВЦП для чтения сигналов с трековой системы (общее количество каналов – 2500), 5 модулей регистров для волоконного годоскопа.

Модули электроники построены на базе микросхем ПЛИС фирмы Altera, а в модулях ВЦП помимо них использованы микросхемы специального назначения НРТДС [5]. В ходе эксперимента часто возникает необходимость переконфигурирования данных микросхем. Такую задачу решает система управления, которая помимо предоставления удаленного доступа к конфигурированию каждого модуля позволяет отслеживать токи потребления и температуры и удаленно управляет источниками питания крейтов с модулями.

Описание системы управления детекторами СПАСЧАРМ

Для решения перечисленных задач были разработаны локальные (находящиеся в непосредственной близости от узла установки) модули управления с использованием 32-разрядных микроконтроллеров семейства Cortex-M3 и Cortex-M4 фирмы STMicroelectronics. Отличительным преимуществом микроконтроллеров данного производителя является взаимозаменяемость чипов: при одинаковой трассировке плат в разных модулях управления можно устанавливать чипы с разной производительностью и характеристиками в зависимости от задач в данной подсистеме или детекторе установки. Такой подход ускоряет процесс разработки системы управления в целом и позволяет создавать избыточную аппаратную базу системы управления, т.к. для простых задач вместо производительного микроконтроллера можно использовать несколько более экономичных чипов, что в свою очередь повышает отказоустойчивость системы. Кроме этого, за счет использования множества локальных модулей управления обеспечивается дальнейшая возможность масштабирования всей системы, т.к. список задач управления неизбежно будет расширяться при развитии экспериментальной установки.

Ниже приведены разработанные микроконтроллерные локальные модули для систем экспериментальной установки.

Мониторинг и конфигурирование модулей регистрирующей электроники системы сбора данных

В модулях регистрирующей электроники ЕвроМИСС широко применяются микросхемы с программируемой логикой – ПЛИС, а также микросхемы с программируемыми параметрами, такие как микросхемы многоканальных ВЦП типа НРТДС [6].

Процесс программирования ПЛИС и редактирование параметров других микросхем требует применения специализированных программирующих устройств (ByteBlasters, XChecker и др.), а при большом количестве модулей может занимать достаточно много времени. В ряде случаев эти ограничения является недопустимыми. Например, при измерении временных интервалов с помощью НРТДС, работающих в режиме повышенной разрешающей способности (25 пс), в ходе эксперимента возникает потребность в калибровке интерполяционной части НРТДС. В свою очередь, для выполнения данной операции необходимо иметь возможность оперативного перепрограммирования параметров корректирующих RC-цепочек в звеньях интерполятора.

Для решения этой проблемы и обеспечения эффективной работы регистрирующей электроники ЕвроМИСС была разработана мезонинная плата [7] на основе микроконтроллера stm32f207, управляемая по независимой от основной магистрали обмена данных ЕвроМИСС последовательной шине CAN. Данная плата устанавливается в каждый модуль электроники и имеет различное программное обеспечение, зависящее от типа модуля.

Выбор в сторону CAN для плат модулей ЕвроМИСС был сделан исходя из двух основных преимуществ данной шины перед Modbus RTU, используемой в других модулях установки:

- арбитраж, реализованный в CAN, позволяет создать одноранговую сеть;
- несколько механизмов контроля и предотвращения ошибок, значительно повышающих надежность передачи данных [8].

Кроме того, шина CAN уже используется для связи с источниками питания модулей регистрирующей электроники [9].

Для связи мезонинной платы с программируемыми узлами в модулях ЕвроМИСС предусмотрено использование ряда интерфейсов. В частности, для конфигурирования

и тестирования НРТДС используется интерфейс JTAG [10]. Протокол JTAG, а также специфичные процедуры для программирования цепочки НРТДС реализованы в ПО микроконтроллера.

В модулях системы ЕвроМИСС в качестве интерфейса для связи с магистралью каркаса используются ПЛИС разных производителей: Altera, Xilinx и др. Данные ПЛИС имеют возможность программирования через интерфейс Passive Serial [11]. Протоколы для обмена с такими интерфейсами также предусмотрены в ПО конфигурирующей платы. При этом наибольшее время затрачивается на конфигурацию ПЛИС типа Асех EP1K10 фирмы Altera. Передача конфигурации таких ПЛИС в 19-и модулях каркаса ЕвроМИСС через интерфейс Passive Serial в виде rbf-файла размером 97 Кбайт, занимает ~1 мин.

Для быстрого поиска неисправного модуля в каркасе ЕвроМИСС в функционал платы также заложено мониторингирование тока потребления каждого модуля и температуры. В настоящее время в регистрирующих модулях системы ЕвроМИСС используются датчики тока с интегрированным аналого-цифровым преобразователем, связь с которыми осуществляется через последовательный синхронный интерфейс I²C. Для работы с такими устройствами у stm32f207 есть соответствующий контроллер, а сигнальные линии I²C предусмотрены в цоколёвке разъёма для связи с мезонинной платой.

На рис. 4 показано расположение мезонинной платы в модуле ВЦП системы ЕвроМИСС. Для доступа к шине CAN в каркасе ЕвроМИСС используется одна из функций универсального контроллера EM-5 [12]. Контроллер работает под управлением операционной системы Linux и использует подсистему SocketCAN, что упрощает разработку программного обеспечения для управления модулями по шине CAN. Основное назначение контроллера EM-5 – чтение данных с модулей ЕвроМИСС, и ресурсы встроенного компьютера по максимуму задействованы для этой цели.

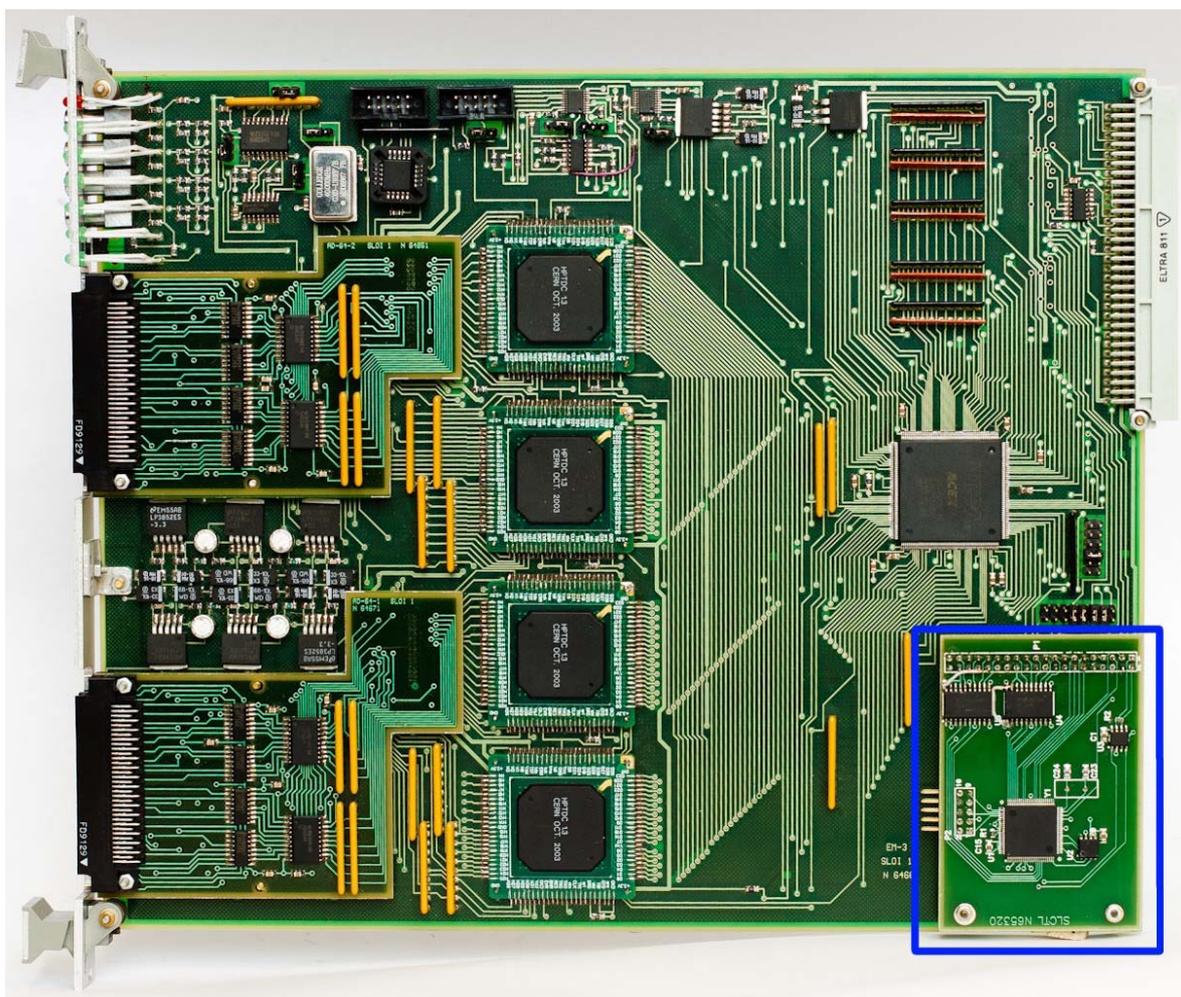


Рис. 4. Модуль ВЦП с установленной мезонинной платой.

В настоящее время изготовлены и используются более 20 мезонинных плат.

Мониторинг магнита мишени Динозавр

Мониторинг параметров магнита обеспечивается специально разработанной платой на базе микроконтроллера *stm32f205*. Микроконтроллер осуществляет измерение тока магнита до 1500 А с точностью измерения 0,4 А каждые 5 с, мониторирует температуру воды на 22 выходах охлаждающих контуров внутри магнита и отслеживает уровень влажности воздуха вблизи магнита с той же частотой.

Измерение тока магнита осуществляется с помощью шунта (75 мВ при 1500 А), установленного на магните. Разность потенциалов шунта подается к каналу АЦП микроконтроллера (ADC_1) по схеме, изображенной на рис. 5.

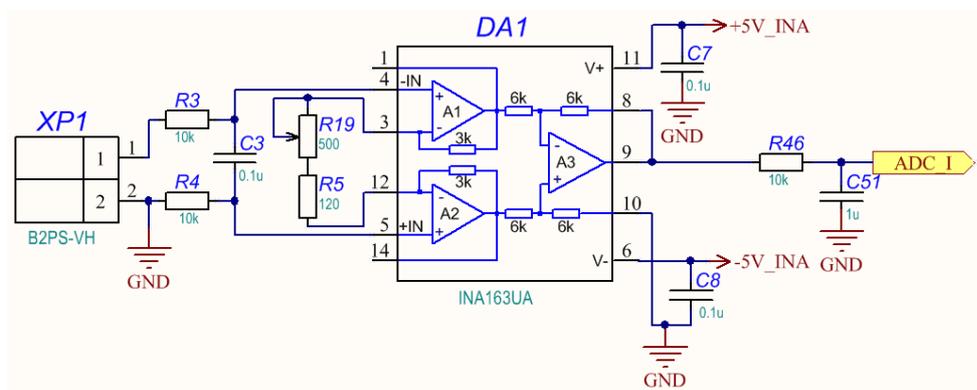


Рис. 5. Схема измерения тока магнита.

Для измерения влажности к плате подключаются два датчика: по интерфейсу SPI модуль BME280 [13], который помимо влажности измеряет температуру и атмосферное давление, и по интерфейсу I²C модуль AM2303 [14]. Максимальное время выполнения всего цикла измерения с обоими модулями составляет 5 мс. Для измерения температур охлаждающих контуров магнита на обмотки были установлены температурные датчики DS1820 (точность измерения 0.5°C) с интерфейсом 1-Wire, время цикла измерений составляет 1 с.

Измерительная плата подключается к шине Modbus RTU, организованной на интерфейсе RS-485. Выбор в пользу Modbus обусловлен простотой данной шины и наличием других устройств в зоне магнита мишени, которые используют тот же интерфейс.

Управление порогом и тестирование усилителей трековых камер

В ходе настройки и испытаний электроники трековых камер [15] нужен инструмент для отправки тестовых импульсов на усилители сигналов с камер, а при работе установки появляется необходимость изменять пороги срабатывания усилителей.

Для этих целей была разработана плата, предназначенная для подключения 8 усилителей. Данная плата также является переходной от усилителей к разъемам модулей ВЦП (рис. 6).

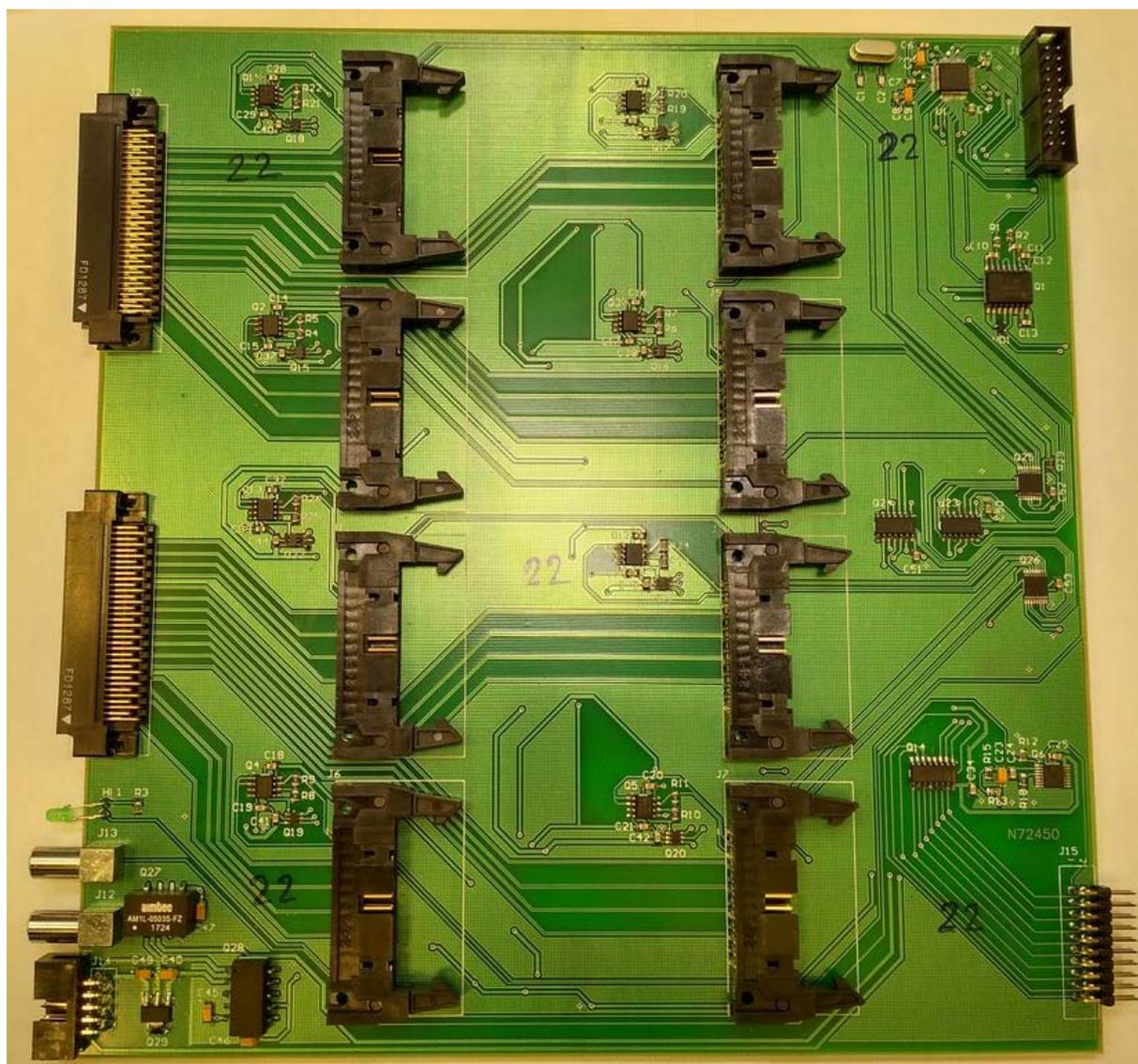


Рис. 6. Переходная плата для 8 усилителей с возможностью задания порогов и отправки тестовых сигналов на усилители.

На плате установлен самый бюджетный микроконтроллер из линейки Cortex-M3 - stm32f100. Микроконтроллер управляет 8 микросхемами ЦАП DAC7512, каждый из которых через операционный усилитель устанавливает порог на одном из усилителей. Тестовый сигнал отправляется на усилители в зависимости от режима работы платы:

- режим 1: для тестирования используется внешний сигнал, который без участия микроконтроллера поступает через драйверы платы на все усилители одновременно;
- режим 2: для тестирования используется внешний сигнал, который с помощью микроконтроллера перенаправляется на один из 8 усилителей;
- режим 3: для тестирования используется сигнал с микроконтроллера, который отправляется на один из усилителей или на все одновременно. При этом микроконтроллером генерируется сигнал LVDS как внешний для синхронизации с модулями ВЦП.

Для подключения переходных плат в систему управления установки был использован интерфейс Modbus RTU. В настоящее время изготовлены и используются более 40 переходных плат.

Архитектура системы управления детекторами

Следующий уровень системы управления СПАСЧАРМ построен с использованием одноплатных компьютеров Raspberry Pi (микропроцессор ARM11) [16], которые получили большую популярность в электронике в основном благодаря своей низкой стоимости и широкого функционала платы, позволяющего использовать их в самых разных встраиваемых системах. В системе управления СПАСЧАРМ компьютеры Raspberry Pi распределены по установке и играют роль приемопередатчиков данных от пользователя к локальным модулям управления, объединенным по полевым шинам CAN bus и Modbus RTU. При этом один компьютер Raspberry Pi может брать на себя функции обмена данными с одним локальным модулем или с несколькими одновременно, что позволяет при отказе одного из компьютеров переназначить его функции другому.

Рекомендованная производителем операционная система Raspbian, основанная на Debian и оптимизированная под аппаратную часть Raspberry Pi, была использована для установки программного обеспечения EPICS и запуска приложений Input/Output controller (IOC). В среде EPICS приложение IOC с одной стороны связывается с устройствами на полевых шинах, а с другой выступает сервером запросов от пользователя. Поддержка протокола Modbus RTU реализована в драйвере, который доступен в качестве дополнительного модуля к EPICS [17]. Протокол CAN bus и его интеграция в ядро операционной системы Raspberry Pi были проработаны для системы управления детекторами эксперимента PANDA (ускорительный комплекс FAIR, Германия) [18] и успешно использованы в системе управления СПАСЧАРМ.

На рис. 7 представлена архитектура всей системы управления СПАСЧАРМ. EPICS предлагает большое разнообразие клиентских программ и инструментов для взаимодействия с приложениями IOC и обработки данных с них, но при этом в EPICS нет универсального средства, который бы включал в себя не только графический интерфейс клиента, но и браузер данных, систему аварийной сигнализации и другие инструменты для диагностики системы управления. Поэтому для использования в СПАСЧАРМ был выбран программный комплекс Control System Studio (CSS), основанный на Eclipse и разработанный коллаборацией ученых из различных научных институтов для создания систем управления крупных установок, использующих программное обеспечение EPICS [19]. CSS объединил в себе средства для разработки графического интерфейса клиента, базу данных (ArchiveEngine), инструмент для работы с системой аварийной сигнализации (AlarmHandler), электронный бортовой журнал и другие полезные средства для работы с системой управления, при этом имеет полную поддержку протокола обмена данными EPICS.

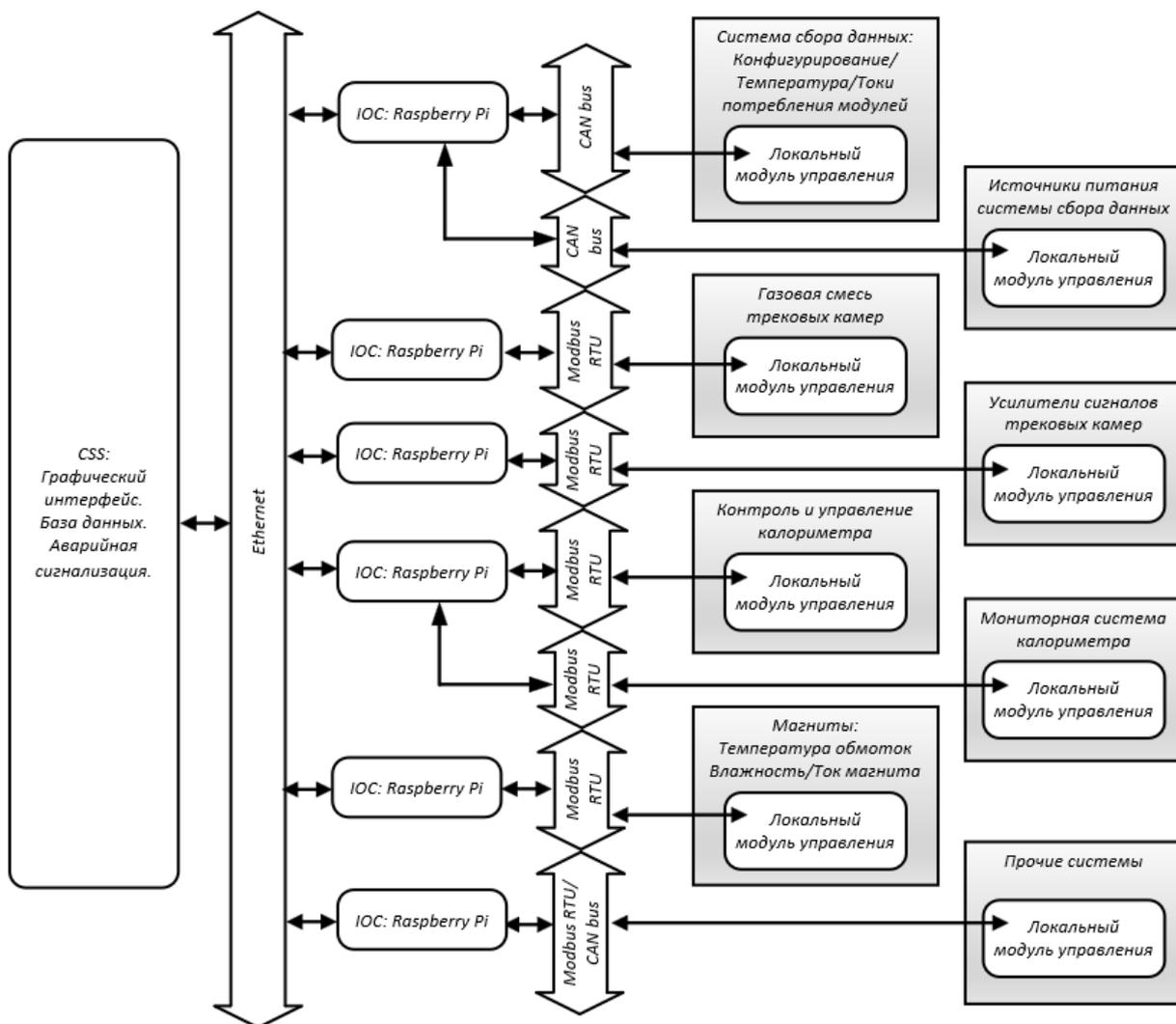


Рис. 7. Архитектура системы управления детекторами установки СПАСЧАРМ.

Графический интерфейс. Архивация данных. Аварийная сигнализация

Интерфейс системы управления СПАСЧАРМ включает в себя графический интерфейс клиента запросов к локальным модулям, аварийную систему и браузер данных. Для ограничения доступа к системе используется несколько учетных записей с разными правами на редактирование. На рис. 8 показан снимок одной из вкладок интерфейса.

Для создания баз данных (параметров системы, аварийных состояний, записей бортового журнала, учетных записей пользователей) использована система PostgreSQL

[20]. Архиватор данных запускается как фоновый процесс, в интерфейсе оператора браузер данных доступен как отдельная вкладка.

Система аварийной сигнализации представляет собой обработчик, который проверяет состояния параметров установки. Каждый параметр установки (температура обмоток магнита, ток потребления, параметры влажности и т.д.) в приложении ЮС приобретает дополнительные поля, содержащие информацию о пределах допустимых значений, которые задаются в конфигурации на Raspberry Pi перед запуском ЮС. В случае аварии обработчик узнает о превышении допустимых пределов параметром от ЮС и оповещает оператора звуковым сигналом либо сообщением, а аварийное состояние сохраняется в базе данных.

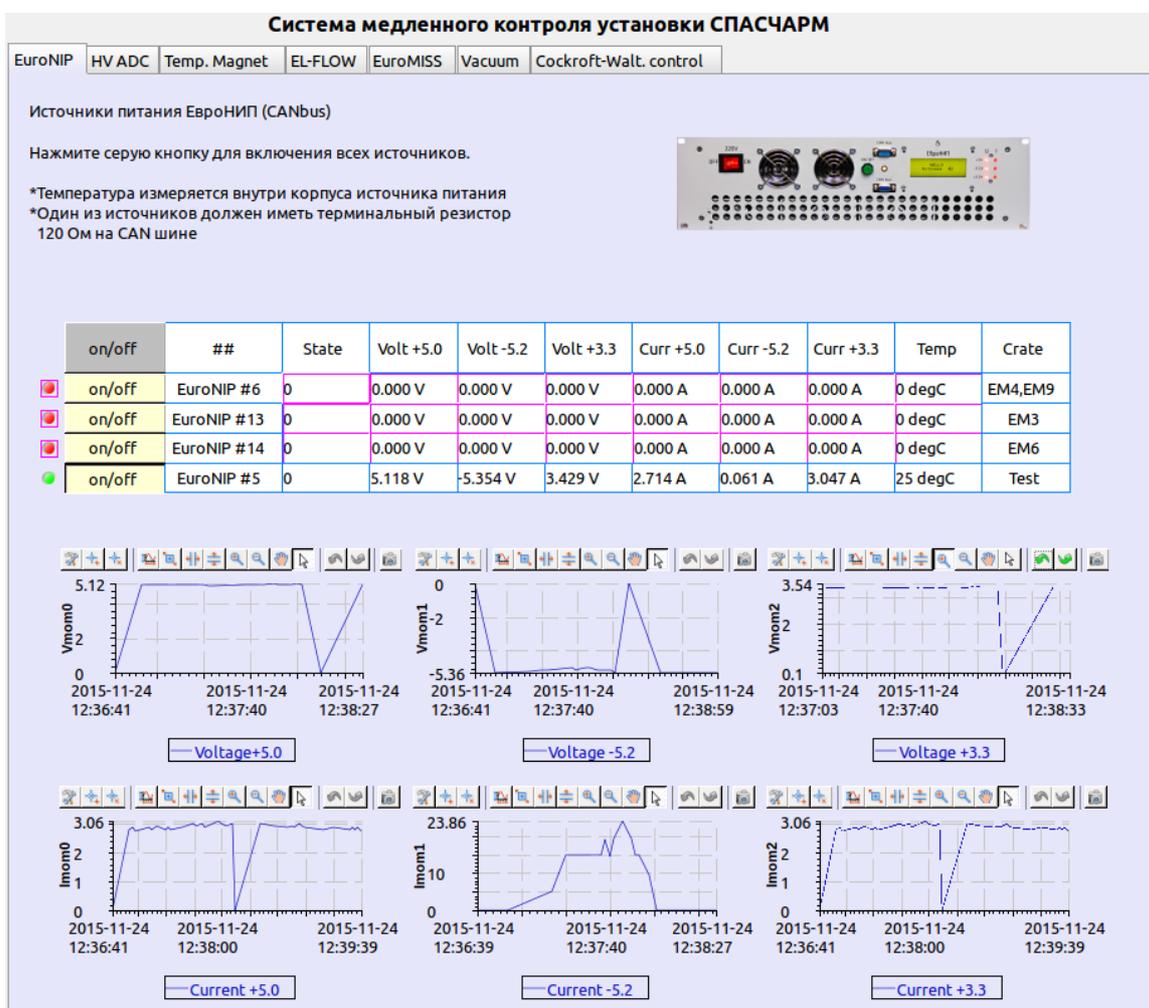


Рис. 8. Графический интерфейс пользователя системы управления детекторами установки СПАСЧАРМ.

Заключение

Описанная система управления была успешно испытана при работе экспериментальной установки СПАСЧАРМ в сеансах работы ускорительного комплекса ИФВЭ осенью 2017 года и весной 2018 года. Система управления обладает рядом достоинств: высокая отказоустойчивость за счет избыточности аппаратной части и резервирования данных, простая масштабируемость за счет разработки независимых локальных модулей и использования одноплатных компьютеров Raspberry Pi, а также гибкость графического интерфейса в среде Control System Studio.

К недостаткам можно отнести возможные сбои в работе Raspberry Pi в условиях работы ускорительного комплекса, что можно решить заменой на более защищенные варианты одноплатных компьютеров (например, BeagleBone Black).

Данная система управления будет полностью использована для установки в стадии 2 на будущем канале №24А.

Работа выполнена при финансовой поддержке Исследовательского центра ФАИР-Россия.

Список литературы

- [1] <https://epics.anl.gov/> – сайт программного комплекса EPICS.
- [2] <https://www.hamamatsu.com/us/en/R7600U-200.html> – техническое описание фотоумножителей Hamamatsu R7600-200-M16.
- [3] А.А.Борисов, Н.И.Божко, А.С.Кожин и др. «Прецизионная дрейфовая трубка в корпусе из лавсана». Приборы и техника эксперимента, 2013 № 2 стр. 16-21.
- [4] Букреева С.И., Емельянов Н.М., Исаев А.Н., Карпеков Ю.Д., Киселев Ю.С., Петров В.С., Сенько В.А., Солдатов М.М., Шаланда Н.А., Якимчук В.И. «Электронная система «ЕвроМИСС» для физических установок ИФВЭ». Приборы и техника эксперимента, 2014 № 6.

- [5] Карпеков Ю.Д., Киселев Ю.С., Сенько В.А. Быстродействующие многоканальные модули ВЦП пикосекундного разрешения с программируемыми параметрами. Препринт ИФВЭ 2011-20, 2011.
- [6] J. Christiansen HPTDC Version 1.3, CERN/EP-MIC.
- [7] Ю.С. Киселёв, Ю.Д. Карпеков, П.А. Семёнов, В.А. Сенько, С.И. Букреева. «Применение 32-битных микроконтроллеров для конфигурирования и мониторинга параметров аппаратуры в системе ЕвроМИСС». Препринт ИФВЭ 2012-12, 2012.
- [8] <http://www.can-wiki.info/doku.php> – техническая документация CAN.
- [9] Букреева С. И., Шаланда В. А., Сенько В. А., Исаев А. Н. Источник питания электронной аппаратуры физических установок ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2011-19, 2011.
- [10] Каршенбойм. И. Г. Jtag тестирование. Современная электроника, 2:50–58, 2007.
- [11] Altera Corporation. Configuration Handbook, 2011.
- [12] С.В. Рыжиков, В.С. Петров, П.А. Семенов, В.И. Якимчук. Структура и программное обеспечение узла сетевой системы сбора данных эксперимента СПАСЧАРМ, Препринт ИФВЭ 2013-13, 2013.
- [13] https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bme280 – техническая документация на модуль BME280.
- [14] <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/DHT22.pdf> – техническая документация на модуль AM2303.
- [15] Патент на полезную модель: "Прецизионная дрейфовая трубка в лавсановом корпусе", № 160135, дата регистрации 11 фев. 2016. Авторы: А.А. Борисов, А.С. Кожин, Р.М. Фахрутдинов.
- [16] <https://www.raspberrypi.org/> – сайт производителя Raspberry Pi
- [17] <https://epics.anl.gov/modules/bus.php#Modbus%20%28Asyn%29> – техническая документация драйвера Modbus RTU в составе EPICS.
- [18] <https://panda-wiki.gsi.de/foswiki/bin/view/DCS/CAN> – описание CAN-интерфейса в системе управления детекторами PANDA
- [19] Kay Kasemir, Gabriele Carcassi. Control System Studio guide for installers and maintainers. 2011.

[20] <http://www.epl.ruhr-uni-bochum.de/~florian/css-panda/> – Control System Studio в PANDA.

Рукопись поступила 25 мая 2018 г.

С.И. Букреева и др.

Распределенная система управления детекторами эксперимента СПАСЧАРМ.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	28.05.2018.	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.	
Печ.л. 1,5.	Уч.– изд.л. 1,92.	Тираж 80.	Заказ 8.	Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2018-6,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2018
