

На правах рукописи

Букреева Софья Игоревна

**Распределенная система управления детекторами  
эксперимента СПАСЧАРМ**

05.13.05 – элементы и устройства вычислительной техники  
и систем управления

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Протвино 2020

УДК 004.3  
004.4  
004.75

М24

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель: **СЕМЕНОВ Павел Александрович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ.

Официальные оппоненты:

**КАРНАЕВ Сергей Евгеньевич**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИЯФ СО РАН;

**МЕРКИН Михаил Моисеевич**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией детекторных систем и электроники МГУ имени М.В. Ломоносова;

**СВИРИДА Дмитрий Николаевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ.

Защита диссертации состоится 19 марта 2020 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.05.03 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31). С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте [ds.mephi.ru](http://ds.mephi.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета, к.т.н.

Веселов Д.С.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность работы**

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ (Протвино) готовится новый эксперимент СПАСЧАРМ (СПиновые АСимметрии в образовании ЧАРМония) [1]. Эксперимент посвящен систематическому изучению поляризационных явлений в адрон-адронных взаимодействиях в диапазоне энергий 10-70 ГэВ и предполагает создание установки, состоящей из десятка разных детекторов и тысяч каналов регистрации. При создании такой экспериментальной установки появляется необходимость разработки удобной в эксплуатации и устойчивой к отказам системы управления детекторами (системы медленного контроля), которая будет выполнять следующие функции:

- Контроль и доступ к управлению параметрами детекторов и других подсистем при работе и настройке экспериментальной установки.
- Своевременное обнаружение неисправностей в работе установки и сигнализация об аварийных ситуациях.
- Мониторинг параметров окружающей среды.
- Архивирование параметров работы установки в базе данных для последующего использования при анализе данных эксперимента с целью их коррекции.

Система управления позволяет осуществлять настройку экспериментальной установки и обеспечивает характеристики детекторов, требуемые для выполнения научной программы эксперимента СПАСЧАРМ.

До настоящего времени на экспериментальных установках НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ не существовало универсального подхода для построения систем управления.

Системы управления создавались с применением смешанных интерфейсов в аппаратном обеспечении и различного программного обеспечения для доступа к электронным модулям, что значительно затрудняет отладку таких систем, ухудшает их масштабируемость, а также снижает надежность работы за счет повышения интенсивности отказов. Для крупных физических установок принципиально важно создавать гибкую и легко масштабируемую систему управления, так как разработка системы управления современной установки идет одновременно с разработкой самой установки. Такие требования вместе с требованием к устойчивости системы могут быть достигнуты за счет децентрализации обработки данных в системе и распределения функций управления между ее компонентами. Другой принципиально важной задачей при разработке распределенной системы управления для обеспечения ее масштабируемости является создание единого протокола и стандартизированной структуры базы данных параметров детекторов для их обработки, отображения и архивирования. Поэтому создание распределенной системы управления и с единым протоколом передачи данных для новой экспериментальной установки СПАСЧАРМ является **актуальной задачей**.

**Объектом исследования** является комплекс детекторов и регистрирующей электроники новой экспериментальной установки. В качестве **предмета исследования** выбран способ разработки и создания системы управления комплекса детекторов, который обеспечит функционирование установки СПАСЧАРМ, требуемое для получения достоверных данных в эксперименте, за счет применения единого протокола передачи данных, распределения функций управления и универсального подхода в разработке программного и аппаратного обеспечения,

и, кроме этого, позволит стандартизировать и ускорить процесс создания систем управления детекторами в других экспериментах на ускорительном оборудовании в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

### **Состояние исследований по проблеме**

В НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ в настоящее время действуют несколько экспериментальных установок, для которых применены разные подходы к построению систем управления детекторами.

В эксперименте ВЕС создана система контроля установки, основанная на современных надежных интерфейсах передачи данных RS485 и CAN [2]. Различные устройства установки подключаются к свободным портам ввода-вывода одного компьютера.

На другой экспериментальной установке СВД [3,4] разработаны микроконтроллерные модули для управления подсистемами установки и применена программная среда LabView [5] для визуализации параметров. Среда LabView также использована при создании системы контроля криогенного комплекса ИФВЭ [6].

В НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ был разработан преобразователь интерфейсов RS485 и CAN в USB, который используется на разных установках. Программная поддержка данного преобразователя создана с использованием программной среды LabView [7].

На экспериментальной установке ФОДС для управления источниками питания электроники были использованы адаптеры интерфейса компании PEAK-System [8].

Для криогенно-вакуумной установки на основе LabView был разработан программный сервис для удаленного анализа и

мониторинга параметров, включающий базу данных и web-интерфейс [9].

Для протонографического комплекса У-70 [10] была создана распределенная система управления. На нижнем уровне этой системы работают распределенные контроллеры, встроенные в оборудование. Связь контроллеров обеспечивается по интерфейсу CAN сетью компьютеров, интерфейс к которым от пульта управления обеспечивается за счет OPC (OLE for Process Control – семейство программных технологий, предоставляющих единый интерфейс для управления объектами автоматизации).

В настоящее время развитие микроконтроллеров укрепило преимущества распределенных систем управления. Обладая широкой встроенной периферией и высокой производительностью, современные микроконтроллеры имеют достаточно низкую стоимость, что позволяет их применять практически повсеместно, создавая в распределенных системах управления аппаратную избыточность, что повышает ее надежность. В системе управления экспериментальной установки с помощью микроконтроллерных систем можно решить задачи контроля параметров непосредственно с детекторов установки.

Современные системы SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных), предназначенные для стандартизации базы данных и единого протокола передачи данных в системах управления, имеют высокую стоимость и узкое применение. Обычно их разрабатывают производители промышленного оборудования, которые ориентируются на собственные продукты, поэтому использование промышленных SCADA-систем для научного экспериментального оборудования вызывает трудности. Более 25 лет назад в Аргоннской национальной лаборатории (США) начали разработку открытого программного комплекса EPICS

(Experimental Physics and Industrial Control System) [11] в помощь разработчикам систем управления крупных экспериментов и ускорительных комплексов. За эти годы EPICS получил широкую поддержку со стороны множества научных лабораторий со всего мира, что существенно повлияло на его развитие. Сейчас EPICS включает в себя программные инструменты и библиотеки для любых операционных систем и интерфейсов, для широкого спектра оборудования различных производителей, предлагает протокол передачи данных и множество клиентов с различными графическими интерфейсами. Многообразие программных средств EPICS позволяет создавать гибкие системы с единым протоколом, обеспечивающим надежность передачи данных, и делает EPICS универсальным инструментом в разработке систем управления и оптимальным выбором при создании системы управления новой экспериментальной установки СПАСЧАРМ.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

**Целью** диссертации является разработка и создание системы управления детекторами эксперимента СПАСЧАРМ, позволяющей осуществлять настройку и контроль экспериментальной установки для выполнения научной программы эксперимента.

Достижение указанной цели обеспечено решением следующих **задач**:

1. Обзор и анализ существующих программных и аппаратных средств для создания систем управления с учетом специфики научного экспериментального оборудования.
2. Разработка микроконтроллерных модулей для мониторинга и управления параметрами экспериментальной установки СПАСЧАРМ.

3. Создание программного и аппаратного обеспечения для подключения микроконтроллерных модулей в сеть с единым протоколом передачи данных, создание графического интерфейса, архиватора и системы аварийной сигнализации.
4. Проведение радиационных исследований при облучении гамма-квантами и нейтронами компонентов системы управления для их размещения в зоне повышенного радиационного фона на экспериментальной установке.

#### **Научная новизна**

В диссертационной работе разработаны новые подходы к созданию системы управления экспериментальной установки на ускорительном комплексе НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ:

1. Впервые для экспериментальной физической установки на ускорительном комплексе НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ разработана и внедрена распределенная система управления параметрами детекторов с единым протоколом данных, что привело к унификации программного обеспечения и к масштабируемости системы управления – существенному фактору для крупной установки.
2. Система управления создана с избыточной аппаратной частью благодаря использованию одноплатных компьютеров и микроконтроллерных модулей, что позволило существенно снизить длину линий передачи аналоговых сигналов и распределить функции управления, тем самым существенно повысив надежность системы управления установки за счет снижения ошибок измерений и повышения ее отказоустойчивости.

3. Магистраль передачи данных системы сбора данных экспериментальной установки впервые была задействована для контроля и управления модулей регистрирующей электроники.
4. Предложена новая методика измерения параметров микросхем в процессе их облучения на оборудовании НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

#### **Практическая значимость**

- Разработана система управления детекторами СПАСЧАРМ, которая является неотъемлемой частью эксперимента и выполняет существенные функции для обеспечения достоверности получаемых в эксперименте данных. Система управления используется при настройке и работе установки на действующем канале частиц №14 и будет использована при развитии установки (увеличении числа детекторов и подсистем) при запуске и работе на проектируемом канале частиц №24А.
- Разработан стенд для проведения радиационных исследований, позволяющий проводить измерение радиационной стойкости электронных компонентов в процессе их облучения на оборудовании НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.
- Проведены радиационные исследования пяти типов микросхем АЦП и датчиков температуры, среди которых найдены радиационно-стойкие. Внедрение радиационно-стойкой микросхемы АЦП в конструкцию генераторов Кокрофта-Уолтона в системе управления переднего калориметра эксперимента PANDA значительно повысило информативность работы детектора.

- Используемые при построении системы управления технические решения в основном не привязаны к особенностям установки СПАСЧАРМ и являются универсальными для экспериментальных установок в физике высоких энергий.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработана, создана и успешно эксплуатируется в сеансах работы ускорительного комплекса распределенная система управления экспериментальной установки СПАСЧАРМ на основе современной микроконтроллерной базы в сочетании с программным комплексом на базе EPICS.
2. Разработана и применена методика определения радиационной стойкости электронных компонентов в процессе их облучения на оборудовании НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ. Проведены исследования радиационной стойкости электронных компонентов системы управления для изучения возможности их расположения в зонах повышенного радиационного фона на экспериментальной установке.
3. Разработана система управления переднего калориметра экспериментальной установки PANDA, послужившая основой при разработке системы управления СПАСЧАРМ.

#### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в создании аппаратных и программных средств систем управления экспериментальной установки СПАСЧАРМ и переднего калориметра PANDA:

- Разработка аппаратного обеспечения системы управления (разработка электрических принципиальных схем и

проектирование печатных плат микроконтроллерных модулей) с учетом обзора существующих решений в системах управления и с учетом анализа детекторов экспериментальной установки;

- Создание программного обеспечения микроконтроллерных модулей и одноплатных компьютеров, составляющих основу системы управления СПАСЧАРМ;
- Подготовка, запуск и отладка всей системы управления: составление конфигурации базы данных, запуск архиватора, разработка графического интерфейса и системы аварийной сигнализации;
- Определение радиационной стойкости компонентов системы управления экспериментальных установок: разработка, отладка и запуск стенда для проведения радиационных тестов и обработка полученных результатов.

#### **Апробация работы**

Апробация работы была проведена на совместном семинаре Отделения экспериментальной физики и семинаре по электронике, DAQ и компьютерингу в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ 16 июля 2019 года. Кроме этого, результаты работы докладывались на рабочих совещаниях коллаборации эксперимента PANDA в 2013-2017 годах, на научных семинарах НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ в 2011-2019 годах, а также на школе-семинаре эксперимента PANDA в ОИЯИ (22-23 октября, 2013, г. Дубна) и на семинаре «Challenges and Opportunities at FAIR and NICA» в НИЯУ МИФИ (1-2 октября, 2015, г. Москва).

### **Публикации**

По основным результатам диссертации опубликованы 3 статьи в журнале «Приборы и техника эксперимента», входящего в перечень ВАК, и 3 статьи в англоязычной версии данного журнала «Instruments and Experimental Techniques», входящего в список Web of Science, а также получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RadTest №2017614721 от 2 мая 2017 года (Автор: Букреева С.И.). Всего по теме диссертации опубликовано 13 работ.

### **Объем и структуры работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материал изложен на 88 страницах, включает 43 рисунка и список литературы из 70 наименований.

## **Содержание работы**

### **Введение**

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, определяются цели и задачи работы, приводится научная и практическая значимость, а также формулируются основные положения, выносимые на защиту.

### **Глава 1. Обзор систем управления в современных экспериментах**

В первой главе приведен обзор систем управления в современных научных экспериментах и рассмотрены факторы, влияющие на подходы и выбор средств при разработке систем управления.

## **Глава 2. Описание экспериментальной установки СПАСЧАРМ**

Во второй главе описывается экспериментальная установка СПАСЧАРМ и изложены задачи управления в детекторах и подсистемах установки. На данный момент экспериментальная установка СПАСЧАРМ на действующем канале частиц №14 ускорителя У-70 содержит следующие основные узлы:

- пучковую аппаратуру;
- комплекс поперечно поляризованной мишени с магнитом «Динозавр»;
- вето-систему;
- 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.

## **Глава 3. Система управления экспериментальной установки СПАСЧАРМ**

Третья глава посвящена описанию системы управления установки. Система управления экспериментальной установкой СПАСЧАРМ представляет собой комплекс программных и аппаратных средств, которые при работе и настройке установки решают задачи управления и контроля параметров детекторов и подсистем, перечисленных во второй главе. Архитектура системы управления СПАСЧАРМ базируется на трех уровнях (Рисунок 1):

- уровне устройств - микроконтроллерных модулей, которые собирают данные о параметрах детекторов и подсистем установки;

- уровне контроля, которые преобразовывают данные от устройств и передают их в сеть;
- уровне управления, на котором данные из сети передаются в графический интерфейс и сохраняются в базе данных.

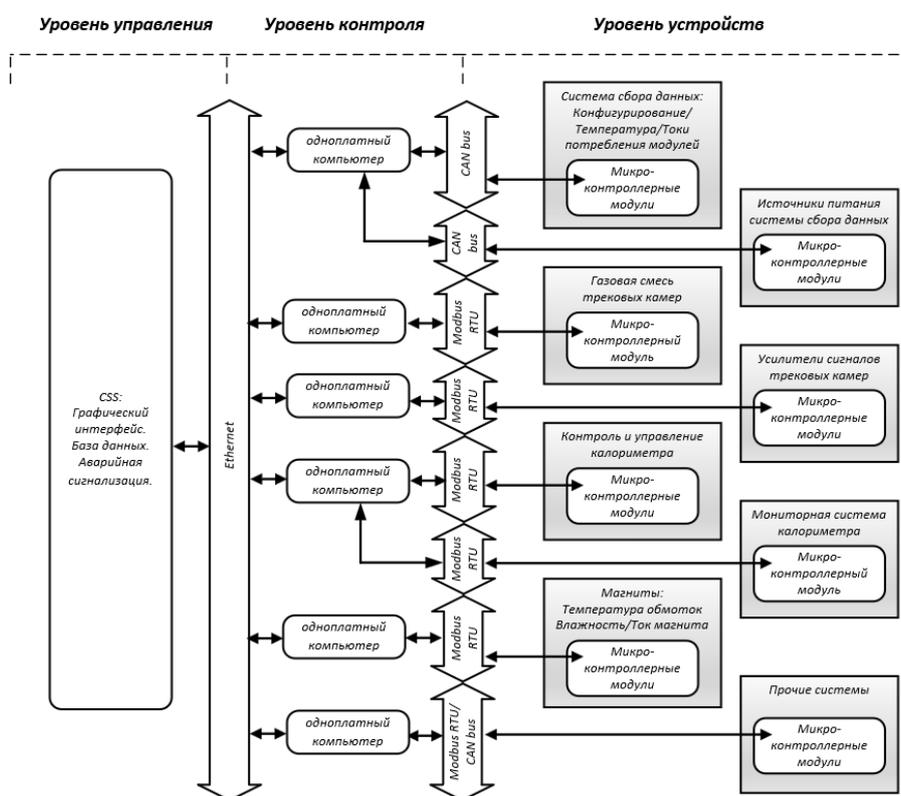


Рис. 1. Архитектура системы управления экспериментальной установки СПАСЧАРМ: CSS – Control System Studio.

При разработке системы управления было решено использовать программную среду EPICS. Программное обеспечение EPICS в этой архитектуре используется на двух

уровнях – уровне управления и уровне контроля – и определяет протокол обмена данными между ними по сети Ethernet. На уровне устройств работают специально разработанные на основе микроконтроллеров модули, которые осуществляют непосредственное измерение и управление параметров детекторов и других подсистем установки. Обмен данными между микроконтроллерными модулями и уровнем контроля определяется протоколами Modbus RTU и CANbus.

Уровень контроля образуют одноплатные компьютеры Raspberry Pi, играющие роль приемо-передатчиков данных между уровнем устройств и уровнем управления. На одноплатных компьютерах запускаются приложения Input/Output controller (ИОС), которые являются частью программного обеспечения EPICS и обеспечивают с одной стороны интерфейс к данным с установки от микроконтроллерных модулей согласно протоколам выбранных полевых шин, а с другой - обрабатывают запросы по протоколу EPICS от уровня управления.

Уровень управления служит для визуализации и архивирования данных. На этом уровне работает клиент, формирующий запросы к приложениям ИОС, обработчик аварийных ситуаций и архиватор данных. Протокол EPICS поддерживает множество клиентских программ, но только программный комплекс Control System Studio (CSS) объединяет в себе все три перечисленные функции и имеет большой набор инструментов для создания графического интерфейса пользователя. В качестве хранилища данных выбрана база данных PostgreSQL.

В третьей главе также описываются реализованные микроконтроллерные модули управления для разных детекторов и подсистем экспериментальной установки. В основу модулей были взяты 32-разрядные микроконтроллеры Cortex-M3 и Cortex-

М4 фирмы STMicroelectronics. Основные разработанные модули следующие:

1. Мезонинные платы для мониторинга и конфигурирования модулей регистрирующей электроники ЕвроМИСС. Данные платы устанавливаются в каждый модуль ЕвроМИСС и служат для программирования ПЛИС и микросхем с программируемыми параметрами типа НРТДС. Кроме этого, мезонинные платы мониторируют ток потребления каждого модуля и температуру воздуха. В настоящее время на установке используются более 20 мезонинных плат.

2. Микроконтроллерная плата для мониторинга параметров магнита мишени «Динозавр». В задачи платы входит измерение величины тока магнита до 1500 А с точностью 0.4 А каждые 10 с, мониторинг температуры воды в охлаждающих контурах внутри магнита и мониторинг параметров окружающей среды: температуры воздуха, влажности и атмосферного давления, которые позволяют косвенно обнаруживать аварийные ситуации.

3. Переходные платы от кабельных трасс накамерных усилителей сигналов трековой системы к разъемам модулей ЕвроМИСС типа ВЦП. Каждая переходная плата подключает 8 усилителей к системе сбора данных ЕвроМИСС и предоставляет возможность настройки порогов срабатывания усилителей и отправки тестовых импульсов на них. В настоящее время на установке используются более 40 переходных плат.

4. Источники питания каркасов регистрирующей электроники. Один источник предназначен для питания до 20 модулей ЕвроМИСС и служит также для мониторинга напряжений, токов потребления и температуры в каркасе. На установке используются 4 источника питания.

Перечисленные модули эксплуатируются в течение нескольких сеансов на установке СПАСЧАРМ. В диссертационной работе описываются также и другие разрабатываемые в настоящий момент микроконтроллерные модули.

Все микроконтроллерные модули по шинам CAN или Modbus RTU подключаются к одноплатным компьютерам Raspberry Pi, которые территориально распределены по установке СПАСЧАРМ. Для возможности такого подключения для Raspberry Pi был сделан адаптер связи с драйверами шины RS485 для Modbus и контроллером CAN.

В конце главы описывается программное обеспечение уровня управления. На уровне управления был выбран программный комплекс Control System Studio (CSS), выполняющий следующие функции:

- Отправка запросов к серверам ИОС и получение данных по протоколу EPICS;
- Графический интерфейс пользователя;
- Браузер данных;
- Архивирование данных в базе;
- Аварийная сигнализация и сохранение истории в базе;
- Бортовой журнал, ограничение доступа к системе управления.

На Рисунке 2 показана структурная схема уровня управления и приложения ИОС уровня контроля.

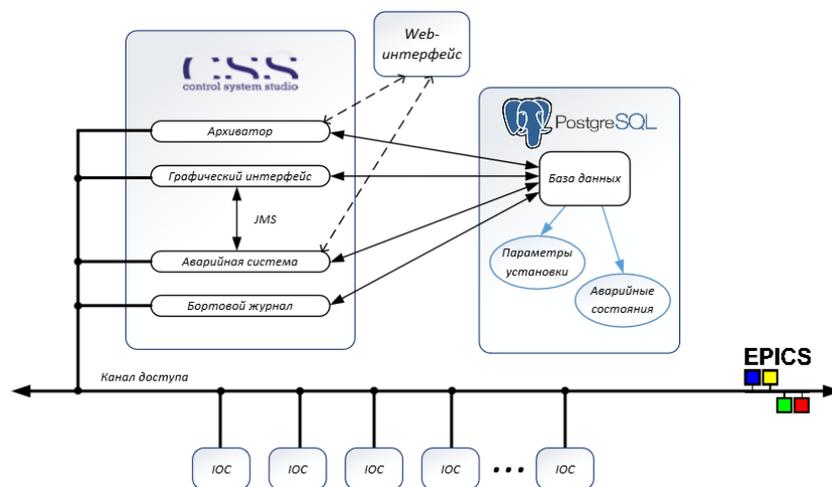


Рис. 2. Структурная схема уровня управления: JMS – Java Message Server.

На уровне управления работают несколько приложений, которые могут быть запущены независимо друг от друга:

1. Клиент с графическим интерфейсом, разработанный с помощью инструмента CSS BOY (Best Opі, Yet), представляет собой самостоятельное приложение. Управление и контроль параметров детекторов и подсистем установки в интерфейсе разделено по разным вкладкам.

2. Система аварийной сигнализации разработана с помощью инструмента CSS BEAST (Best Ever Alarm System Toolkit) и состоит из обработчика аварийных состояний AlarmServer и приложения для конфигурирования обработчика AlarmConfigTool. AlarmServer запускается как фоновый процесс, при запуске читает конфигурацию данных (переменных процесса – PV) из базы данных и далее сканирует указанные PV на аварийные состояния. В случае изменения аварийного состояния на аварийное AlarmServer уведомляет клиента. Аварийное

состояние переменной фиксируется в базе данных. Обмен данными между системой аварийной сигнализацией и графическим интерфейсом осуществляется по протоколу JMS, реализованному в ActiveMQ. Система аварийной сигнализации имеет web-интерфейс для простого и быстрого анализа количества и частоты сбоев, но при работе установки более актуальными являются функции системы аварийной сигнализации, встроенные в графический интерфейс клиента:

- Звуковое оповещение в случае критических неисправностей на установке;
- Инструкции в случае аварийной ситуации;
- Управление аварийными состояниями;
- Редактирование конфигурации базы данных;
- Браузер данных аварийной сигнализации.

3. Архиватор данных ArchiveEngine конфигурируется приложением ArchiveConfigTool и запускается как фоновый процесс, который выполняет сканирование переменных процесса PV и один раз в 30 с сохраняет накопленные значения PV в базе данных. В качестве системы управления базой данных используется PostgreSQL. Архиватор данных также имеет web-интерфейс, позволяющий узнать время запуска, список подключенных и отключенных PV, последние сохраненные значения и т. д. Графический интерфейс клиента имеет браузер данных, который выводит сохраненные значения PV в виде графиков и диаграмм с возможностью рассылки этой информации по электронным адресам.

Описанная система управления экспериментальной установки СПАСЧАРМ проработала в течение трех сеансов запуска установки на пучке.

#### **Глава 4. Система управления переднего калориметра в эксперименте PANDA**

В четвертой главе описывается система управления переднего калориметра типа «шашлык» в эксперименте PANDA. Передний калориметр типа «шашлык» в PANDA служит для регистрации энергий частиц, в основном фотонов и электронов, в широком динамическом диапазоне и на данный момент тестируется в виде 36-канального прототипа. В финальном варианте на установке будет работать калориметр из 1512 каналов. Каждый канал калориметра состоит из фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) Hamamatsu R7899 и генератора Кокрофта-Уолтона.

Основные задачи системы управления переднего калориметра:

- управление питанием генераторов Кокрофта-Уолтона;
- мониторинговая система.

Задачи управления для переднего калориметра решаются с использованием программных средств EPICS и с помощью микроконтроллерных модулей, которые подключаются по протоколу Modbus RTU к приложениям ИОС на одноплатных компьютерах, которые в свою очередь связываются по протоколу EPICS с клиентом системы управления переднего калориметра.

Для управления питанием генераторов были разработаны микроконтроллерные модули CWCU (Cockcroft-Walton Control Unit), выполняющие следующие функции:

- Управление высоким напряжением на генераторах;
- Обратная связь с генераторов от АЦП о высоком напряжении;
- Контроль низких напряжений питания;
- Мониторинг токов потребления;

- Запись и хранение кодов опорных напряжений для высокого напряжения.

Система управления питанием генераторов реализована для 36-канального прототипа калориметра «шашлык» и отработала несколько сеансов на ускорителях ОУ-У70 (Протвино, Россия) и МАМІ (Майнц, Германия).

Далее в главе приводятся описания мониторинговых систем. Для мониторинга модулей калориметра «шашлык» разрабатываются две мониторинговые системы: передняя и задняя. Передняя мониторинговая система служит для быстрой и простой проверки каналов и цепей считывающей электроники детектора и предполагает установку светодиода в каждый 4-канальный модуль «шашлыка» с использованием одного многоканального источника зажигания светодиодов. Задняя мониторинговая система предназначена для более прецизионного мониторинга коэффициента усиления ФЭУ в каждом канале и будет состоять из двух идентичных генераторов световых импульсов, распространяющих по оптоволоконной сети световые импульсы в каждый канал детектора. Каждый генератор предназначен для половины детектора.

Для обеих мониторинговых систем был разработан прототип микроконтроллерной платы MSCU – Monitoring Slow Control Unit, которая в передней мониторинговой системе выполняет управление зажиганием светодиодов, а для задней мониторинговой системы измеряет сигнал с опорного фотодиода и температуру внутри генератора и оценивает стабильность работы генератора.

## **Глава 5. Радиационные исследования компонентов систем управления СПАСЧАРМ и PANDA**

В пятой главе приводятся результаты радиационных исследований микросхем, используемых в системах управления

PANDA и СПАСЧАРМ. Были проведены радиационные тесты пяти типов микросхем АЦП разных производителей и датчиков температуры в двух циклах измерений: при облучении гамма-квантами с использованием радиоактивного источника и при облучении адронами с энергией до 200 МэВ (преимущественно нейтронами) в зоне поглотителя пучка бустера ускорительного комплекса У-70.

Для непрерывного отслеживания изменений в компонентах во время облучения был собран стенд, включающий в себя микроконтроллерный блок CWCU, описанный в четвертой главе, и одноплатный компьютер Raspberry Pi, который передавал параметры микросхем, полученные от CWCU по шине Modbus RTU, в базу данных системы управления, работающую по протоколу EPICS. Такая схема сбора данных с облучаемых образцов полностью повторяет цепочки передачи данных в системах управления экспериментальной установки СПАСЧАРМ и переднего калориметра PANDA, что доказывает их гибкость и универсальность применения.

На первом этапе исследования образцы были облучены с использованием радиоактивного источника гамма-квантов дозой мощностью 2.7 Гр/ч. Интегральная доза составила 535 Гр. Для оценки изменения интегральной нелинейности в облученных образцах полное время сбора данных было разделено на временные участки, для каждого из которых рассчитаны передаточные характеристики АЦП с последующей их аппроксимацией по средним значениям выходных кодов, полученных на конкретном участке. Далее были подсчитаны интегральные нелинейности АЦП на соответствующих участках. Интегральные нелинейности для десятого временного участка, к концу которого интегральная доза составляла 535 Гр, показаны на Рисунке 3.

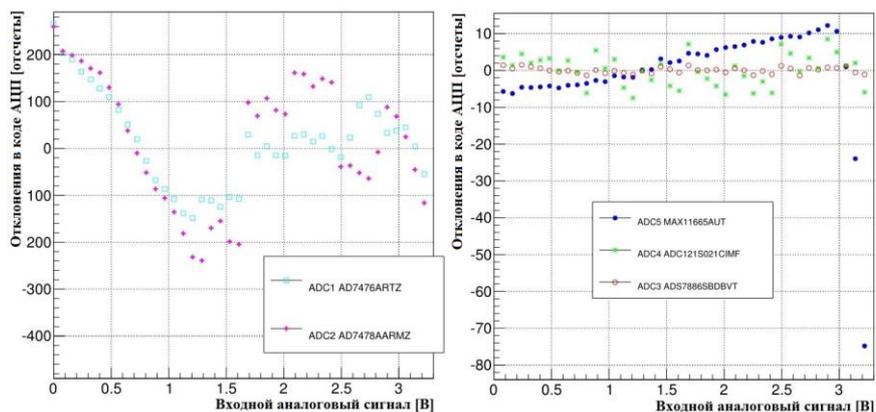


Рис. 3. Интегральная нелинейность АЦП фирмы Analog Devices (слева) и АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated (справа) на временном участке, интегральная доза на котором достигла 535 Гр: ADC1...ADC5 – наименования микросхем АЦП.

На втором этапе облучения образцы были протестированы под воздействием поля нейтронов, интегральный флюенс которого в конце тестирования достиг  $10^{13}$  нейтронов/см<sup>2</sup>. Оценка повреждения АЦП проводилась аналогично предыдущим измерениям при гамма-облучении: полное время сбора данных разделено на временные участки, для каждого из которых были подсчитаны интегральные нелинейности АЦП. Период с интегральным флюенсом  $10^{13}$  нейтронов/см<sup>2</sup> разделен на 4 участка (по 22 ч каждый). Интегральные нелинейности АЦП для последнего участка показаны на Рисунке 4. Также была проведена оценка влияния облучения на шум АЦП для двух типов микросхем ADC3 и ADC5.

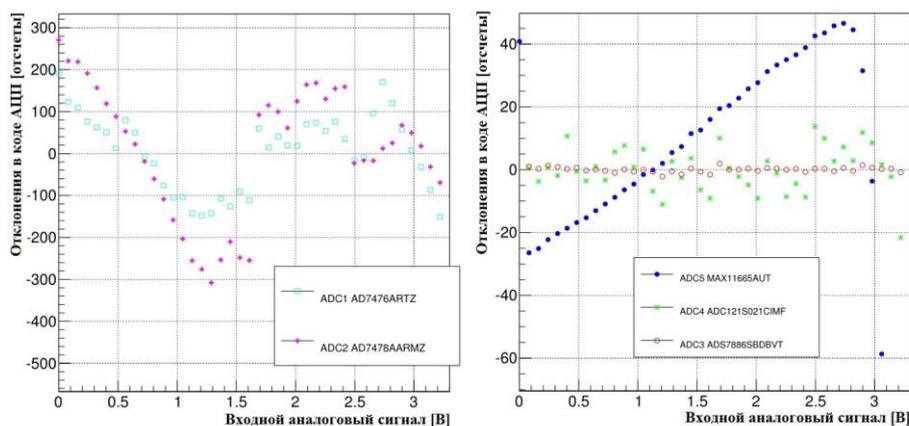


Рис. 4. Интегральная нелинейность АЦП фирмы Analog Devices (слева) и АЦП фирм Texas Instruments и Maxim Integrated (справа) на временном участке с интегральным флюенсом  $10^{13}$  нейтронов/см<sup>2</sup>:  
ADC1...ADC5 – наименования микросхем АЦП.

Кроме микросхем АЦП, при нейтронном облучении были протестированы датчики температуры фирмы Dallas. Для тестов выбраны два 12-битных датчика DS18B20 и один 9-битный датчик DS1820. Один контрольный датчик DS18B20 был расположен вне зоны облучения. Спустя 69 ч от начала облучения (флюенс менее  $10^{12}$  нейтронов/см<sup>2</sup>) один из датчиков вышел из строя и нарушил передачу данных по шине 1-Wire.

Из протестированных АЦП для контроля установленного высоковольтного напряжения ФЭУ выбраны микросхемы ADS7886SBDBVT (Texas Instruments). Исследования также показали, что микросхемы цифровых термометров фирмы Dallas не могут надежно работать в условиях даже относительно низкого фона нейтронов и нарушают передачу данных по шине 1-Wire.

### **Заключение**

В заключении приведены результаты, полученные в работе.

### **Основной результат**

Разработана и создана распределенная система управления экспериментальной установки СПАСЧАРМ.

### **Основной теоретический результат**

Обоснованы преимущества распределенной системы управления с единым протоколом передачи данных на базе программной среды EPICS и с использованием микроконтроллерных устройств. Преимущества заключаются в повышении надежности работы системы управления, в достижении гибкости и масштабируемости по сравнению с системами управления других экспериментальных установок в НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ.

### **Основной практический результат**

Описанная в диссертационной работе система управления используется в сеансах работы ускорительного комплекса при настройке и работе экспериментальной установки СПАСЧАРМ на канале частиц №14.

### **Частные практические результаты и их внедрение**

1. Разработаны, отлажены и запущены в эксплуатацию микроконтроллерные модули для управления и мониторинга параметров детекторов и подсистем установки, которые на аппаратном уровне позволяют осуществлять настройку и контроль работы установки, требуемые для выполнения научной программы эксперимента СПАСЧАРМ.
2. Создана система для удаленного доступа к параметрам с графическим интерфейсом, система архивирования параметров в базе данных, а также система аварийной сигнализации экспериментальной установки, которые в

совокупности позволяют своевременно отслеживать аварийные состояния в детекторах и регистрирующей электронике экспериментальной установки и управлять их параметрами. Использование архива параметров детекторов дает возможность корректировать полученные в эксперименте данные.

3. Проведена работа по созданию системы управления переднего калориметра экспериментальной установки PANDA. При выполнении этой работы разработаны микроконтроллерные модули и программные средства EPICS, которые послужили основой при разработке системы управления СПАСЧАРМ. Использование уже отлаженных микроконтроллерных модулей и программного обеспечения ускорило разработку системы управления СПАСЧАРМ.
4. Разработана и применена методика измерений радиационной стойкости электронных компонентов с использованием оборудования НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, позволяющая оценивать повреждения компонентов непрерывно в процессе их облучения и отбирать микросхемы промышленного исполнения для использования в электронике систем управления экспериментальных установок, не прибегая к использованию дорогостоящих микросхем радиационно-стойкого исполнения. По данной методике исследована радиационная стойкость электронных компонентов, используемых на установках PANDA и СПАСЧАРМ в блоках систем управления детекторами, расположенных в зонах повышенного радиационного фона.

Результаты диссертационной работы были получены при поддержке грантов РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований) №12-02-31408 в 2012-2013 годах, №15-02-01669 в 2015 – 2017 г., №16-02-00667 в 2016 – 2018 г., №18-02-00006 в 2018 - 2020 г. и международного гранта Исследовательского центра ФАИР-Россия в 2014-2017 годах.

Результаты диссертационной работы были отмечены премией Губернатора Московской области в сфере науки и инноваций для молодых ученых и специалистов в 2018 году.

**Основные результаты работы** диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Букреева С.И., Гончаренко Ю.М., Семенов П.А. Система управления переднего калориметра типа «шашлык» в эксперименте PANDA // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – №2. – С. 40-48.
- [2] Беликов Н.И., Букреева С.И., Миличенко Ю.В., Морозов Д.А., Семенов П.А., Сенько В.А., Узунян А.В. Исследование радиационной стойкости компонентов системы управления переднего калориметра установки PANDA // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – №2. – С. 44-52.
- [3] Букреева С.И., Васильев А.Н., Гончаренко Ю.М., Деревщиков А.А., Маслова Е.В., Мельник Ю.М., Мещанин А.П., Мочалов В.В., Рыжиков С.В., Рязанцев А.В., Семенов П.А., Сенько В.А., Шаланда Н.А. Распределенная система управления детекторами эксперимента СПАСЧАРМ // Приборы и техника эксперимента. – 2019. – №2. – С. 12-19.
- [4] Bukreeva S. I., Vasil'ev A. N., Goncharenko Yu. M., Derevshchikov A. A., Maslova E. V., Mel'nik Yu. M., Meshchanin A. P., Mochalov V. V., Ryazantsev A. V.,

Ryzhikov S. V., Semenov P. A., Sen'ko V. A., and Shalanda N. A. The distributed control system for detectors of the SPASCHARM experiment // Instrum. Exp. Tech. — 2019. — Vol. 62, no. 2. — P. 150-156.

- [5] Belikov N.I., Bukreeva S.I., Milichenko Y.V., Morozov D.A., Semenov P.A., Sen'ko V.A., Uzunyan A.V. Studying the radiation hardness of the control system components for the forward calorimeter in the PANDA experiment // Instrum. Exp. Tech. — 2018. — Vol. 61, no. 2. — P. 205-213.
- [6] Bukreeva S. I., Goncharenko Yu. M., Semenov P. A. A control system for the “shashlyk” forward calorimeter in the PANDA experiment // Instrum. Exp. Tech. — 2017. — Vol. 60, no. 2. — P. 193-201.

Кроме этого, по теме диссертации опубликованы следующие работы:

- [7] Букреева С.И., Шаланда В.А., Сенько В. А., Исаев А.Н. Источник питания электронной аппаратуры физических установок ИФВЭ // Препринт ИФВЭ 2011- 19. – 2011. – С. 1-13.
- [8] Киселёв Ю.С., Карпеков Ю.Д., Семенов П.А., Сенько В.А., Букреева С.И. Применение 32-битных микроконтроллеров для конфигурирования и мониторинга параметров аппаратуры в системе ЕвроМИСС // Препринт ИФВЭ 2012-12. – 2012. – С. 1-13.
- [9] 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. – С. 23-27.

- [10]Novotny R.W., Diehl S., Dormenev V., Drexler P., Bukreeva S., Morozov D., Ryzhikov S., Semenov P. Response of the shashlik forward spectrometer of PANDA to photons below 800 MeV energy // 2014 IEEE Nuclear science symposium and medical imaging conference, NSS/MIC – 2014. – С. 1-4.
- [11]Букреева С.И., Гончаренко Ю.М., Семенов П.А. Система управления переднего калориметра типа «шашлык» в эксперименте PANDA // Препринт ИФВЭ 2016-3. – 2016. – С. 1-19.
- [12]Mochalov V.V., Abramov V.V., Bazhanov N.A., Belikov N.I., Borisov A.A., Borisov N.S., Bukreeva S.I., Goncharenko Y.M., Davidenko A.M., Derevshikov A.A., Fahrudtinov R.M., Kozhin A.S., Lazarev A.B., Melnik Y.M., Meschanin A.P., Minaev N.G., Morozov D.A., Neganov A.B., Nogach L.V., Nurushev S.B., Petrov V.S., Prudkoglyad A.F., Ryazantsev A.V., Rykov V.L., Ryzhikov S.V., Semenov P.A., Senko V.A., Shalanda N.A., Shchevelev O.N., Soldatov M.M., Soloviev L.F., Strikhanov M.N., Vasiliev A.N., Usov Y.A., Yakimchuk V.I., Yakutin A.E. Study of single-spin asymmetries with polarized target at the SPASCHARM experiment at U70 accelerator // Journal of physics: conference series 678 - Num. 1. – 2016. – С. 1-6.
- [13]Semenov P.A., Bogdanov A.A., Bukreeva S.I., Chetvertkov M.A., Chetvertkova V.A., Garkusha V.I., Meschanin A.P., Mochalov V.V., Nurushev S.B., Nurusheva M.B., Runtso M.F., Ridiger A.V., Rykov V.L., Ryzhikov S.V., Strikhanov M.N., Vasiliev A.N., Zapolsky V.N.. Polarimeters for the SPASCHARM experiment // International journal of modern physics: conference series - 40. – 2016. – С. 1-7.

### Список использованной литературы

- [1] Abramov V.V., Belikov N.I., Goncharenko Yu.M., Grishin V.N., Davidenko A.M., Derevshchikov A.A., Kachanov V.A., Konstantinov D.A., Kormilitsyn V.A., Melnik Yu.M., Meshchanin A.P., Minaev N.G., Mochalov V.V., Morozov D.A., Nogach L.V., Nurushev S.B., Ryazantsev A.V., Ryzhikov S.V., Semenov P.A., Soloviev L.F., Prudkoglyad A.F., Uzunian A.V., Vasiliev A.N., Yakutin A.E., Bazhanov N.A., Borisov N.S., Kolomiets V.G., Lazarev A.B., Neganov A.B., Plis Yu.A., Shchevelev O.N., Usov Yu.A., Chetvertkova V.A., Chetvertkov M.A. Preparation of new polarization experiment SPASCHARM at IHEP // Journal of Physics: Conference Series. – 2011. – Vol. 295, Num. 1.
- [2] Васильев Д.А., Екимов А.В., Лутчев А.В., Новоселов А.А., Федорченко В.Н., Хохлов Ю.А. Система контроля установки ВЕС // Препринт ИФВЭ 2013-2. – 2013.
- [3] Алферов В.Н., Васильев Д.А., Головкин В.Ф., Коробчук П.П., Лутчев А.В., Маляев В.Х., Рядовилов В.Н., Соловьев В.А., Федорченко В.Н., Холкин А.Н. Измерение магнитного поля установки СВД-2 // Препринт ИФВЭ 2018-2. – 2018.
- [4] Головкин В.Ф., Головня С.Н., Горохов С.А., Устинов Е.А. Система перемещения гамма-детектора установки СВД // Препринт ИФВЭ 2012-26. – 2012.
- [5] Сайт программной среды LabView. – Режим доступа: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html>
- [6] Агеев А.И., Алферов В.Н., Бакай А.И., Васильев Д.А., Кренделев В.А., Лутчев А.В., Федорченко В.Н., Холкин А.Н. Система контроля криогенного комплекса ИФВЭ для сепарации каонов, основанная на LabView // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – №9. – С. 56-58.

- [7] Васильев Д.А., Кренделев В.А., Лутчев А.В., Федорченко В.Н., Холкин А.Н. Преобразователь интерфейсов АС-4 // Препринт ИФВЭ 2011-2. – 2011.
- [8] Паталаха Д.И., Калинин А.Ю., Кулагин Н.В. Управление источниками высокого напряжения на установке ФОДС // Препринт ИФВЭ 2016-5. – 2016.
- [9] Лобов И.В., Лутчев А.В., Столяров М.Н., Сухов С.А. Программный сервис мониторинга и обработки данных криогенной установки // Препринт ИФВЭ 2015-16. – 2015.
- [10] Атрощенко С.А., Копылов Л.И., Матюшин А.А., Меркер С.Э., Михеев М.С. Система управления протонографическим комплексом У-70 // Препринт ИФВЭ 2014-9. – 2014.
- [11] Сайт программной среды EPICS. – Режим доступа: <https://epics.anl.gov/>

*Рукопись поступила 9 января 2020 г.*

С.И. Букреева

Распределенная система управления детекторами эксперимента  
СПАСЧАРМ.

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

---

Подписано к печати 09.01.2020. Формат 60x84/16. Цифровая печать.  
Печ.л. 1,88. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 100. Заказ 1. Индекс 3649.

---

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

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

Индекс 3649

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2020

---

