



Государственный научный центр Российской Федерации –
Институт физики высоких энергий
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

ИФВЭ 2014–9
ОУК

**С.А. Атрощенко, Л.И. Копылов, А.А. Матюшин, С.Э. Меркер,
М.С. Михеев**

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОТОНОГРАФИЧЕСКИМ
КОМПЛЕКСОМ У-70**

Направлено в ПТЭ

Протвино 2014

Аннотация

Атрощенко С. А. и др. Система управления протонографическим комплексом У-70: Препринт ИФВЭ 2014–9. – Протвино, 2014. – 12 с., 3 рис., библиогр.: 3.

В ИФВЭ на базе канала инжекции создана установка для прикладных исследований – Протонный радиографический комплекс. Для управления установкой была разработана Система Управления (СУ). Принятые решения, опыт реализации и работы СУ описывается в данной статье.

Abstract

Atroshenko S.A. et al. Title: The control system for the U-70 Proton radiographic complex. IHEP Preprint 2014–9. – Protvino, 2014. – p. 12, figs. 3, refs.: 3.

In IHEP based on the old beam transfer line the new installation for applied research - Proton radiographic complex has been created. To operate the facility the Control System (CS) was designed. The adopted decisions, implementation and operational experiences are described in this article.

Введение

В ИФВЭ на базе канала инъекции (КИ) создана установка для прикладных исследований – Протонный радиографический комплекс (ПРГК) [1]. Пучок протонов с энергией 50-70 ГэВ из ускорителя У-70 выводится в магнитооптический канал, в котором находится установка для протонной радиографии плотных объектов. Оборудование канала состоит из 76 магнитооптических элементов, 12 вакуумных постов предварительной откачки, 38 магниторазрядных насосов, 12 профилометров пучка, пучкового затвора, системы дверных блокировок и индикационных табло. Длина оптической части канала составляет ~900 м. Технологическое оборудование ПРГК размещено в 8-ми зданиях.

Для управления установкой была разработана система управления (СУ), которая и описывается в данной статье. СУ ПРГК обеспечивает настройку режима магнитной оптики, синхронизирует канал с выводными устройствами ускорителя, осуществляет сбор данных о работе установки, следит за состоянием оборудования и блокировок, ведёт архив, поддерживает интерактивный диалог с оператором, вырабатывает разрешение на запуск экспериментальной установки.

Мы стремились реализовать СУ с четкими стандартными границами между уровнями. Таких уровней в нашей системе три (снизу вверх): контроллер оборудования (КО), компьютер переднего края (КПК) и пульт управления (ПУ).

При построении программного обеспечения была выбрана объектно-ориентированная модель, управляемая данными. Это значит, что для всех типов оборудования были определены структуры данных и методы их обработки.

Соответствующие объекты были разработаны для доступа к оборудованию и интерфейса пользователя. Принятые решения, опыт реализации и работы СУ комплекса описаны ниже.

Аппаратная часть системы управления

Система управления ПРГК (СУ) состоит из пульта управления, серверов, компьютеров переднего края, объединённых сетью управления (далее - *верхний уровень системы*) и контроллеров оборудования с технологической сетью (далее - *нижний уровень*). Структура системы представлена на рис. 1.

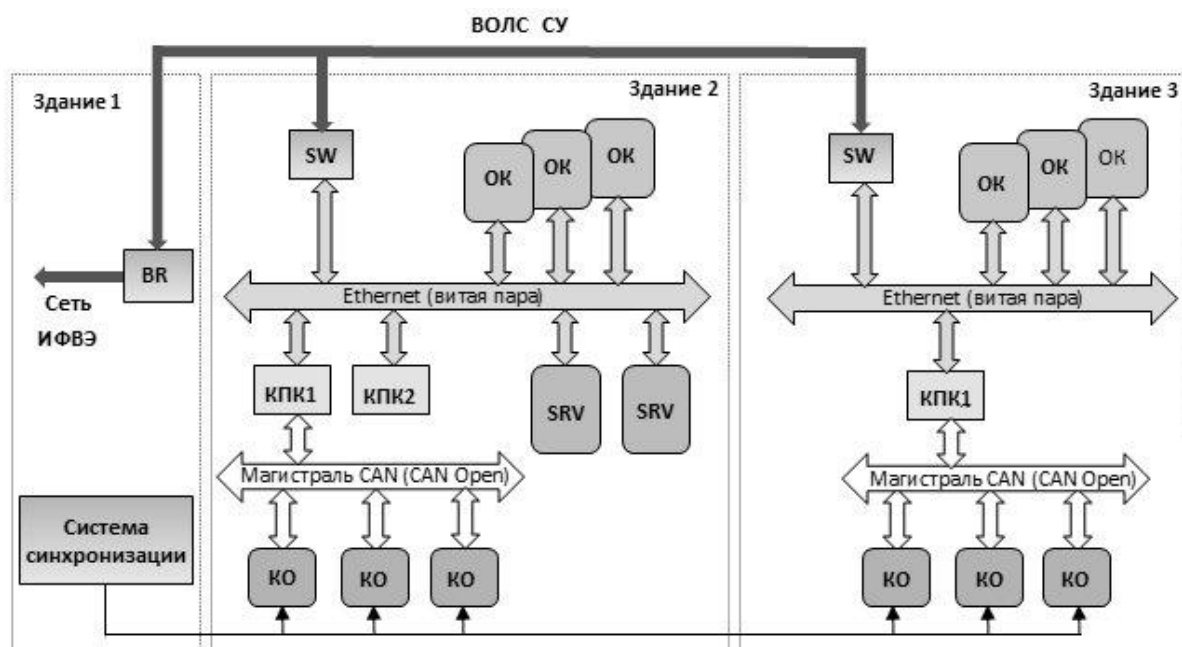


Рис. 1. Функциональная схема СУ.

Пульт управления

Пульт управления состоит из нескольких персональных компьютеров, именуемые операторскими консолями (ОК на рис. 1). На любой операторской консоли может выполняться любая прикладная программа из состава программного обеспечения СУ. В оперативном режиме одна консоль используется для настройки канала, вторая для работы с данными диагностики пучка и расчётов, третья для контроля состояния блокировок и управления пучковым затвором. Кроме того, в технологических зданиях

установлены вспомогательные ОК, используемые для локального контроля режимов вакуумного оборудования и источников питания магнитной оптики.

ОК размещены в отдельном помещении, с нормальными климатическими условиями и низким уровнем электромагнитных помех, поэтому могут использоваться любые офисные компьютеры с операционной системой Windows и установленным .NET Framework.

Компьютеры переднего края (КПК)

Компьютеры переднего края выполняют обмен данными с контроллерами оборудования и обеспечивают однородный интерфейс доступа к данным для операторских консолей. Как видно из структурной схемы (рис.1), КПК находится в узле, сбой в работе которого, является фатальным для системы. Исходя из требования повышенной надёжности, в качестве КПК использованы компьютеры в промышленном исполнении, так называемые станции технологического управления. В каждую станцию устанавливается необходимое число связных карт (PC-CAN) для формирования технологической сети. В СУ ПРГК наиболее нагруженный КПК с 4-мя связными картами обеспечивает обмен данными с 60 контроллерами оборудования разного типа на скорости 20 кбит/с. Расширение системы за счёт подключения нового оборудования осуществляется достаточно просто. Контроллеры могут подключаться к существующим ветвям технологической сети, либо входить в новую ветвь, так как максимальное число связных карт, которые можно установить в КПК, шесть.

Серверы

Серверная часть СУ использует компьютеры для выполнения специализированных функций:

- Файловый сервер предназначен для централизованного хранения программного обеспечения. Сервер обеспечивает доступ к файлам с любой операторской консоли и КПК, а также осуществляет хранение рабочих конфигураций для управляющих программ.
- Сервер базы данных предназначен для хранения систематизированных рабочих параметров и данных системы управления. Данные используются для настройки

системы и отображения параметров установки в графическом или табличном виде.

Сетевое оборудование

Система управления охватывает четыре технологических здания. Сетевое оборудование обеспечивает связь между частями СУ внутри технологических зданий и между ними. Внутри зданий используется Ethernet (витая пара). Для связи между зданиями проложена волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) с различными типами волокон:

- Одномодовое волокно используется для обмена данными между компьютерами СУ;
- Многомодовое волокно используется для трансляции синхроимпульсов и вспомогательных сигналов управления.

Все компьютеры СУ объединены в единый технологический домен. Два контроллера домена обеспечивают отказоустойчивость в случае неисправности одного из них. Сеть СУ соединена с сетью ИФВЭ через шлюз (BR на рис. 1), который препятствует проникновению в сеть СУ паразитного трафика, но обеспечивает доступ к системе управления У-70, и в частности, к цифровым осциллографам интенсивности пучка и напряженности магнитного поля.

В каждом здании, в котором расположено оборудование СУ, находится управляемый коммутатор (SW на рис 1). Используются модели коммутаторов Link DES-3200 с портами Gigabit Ethernet/SFP. Приемопередатчики с рабочими длинами волн 1310/1550 нм подключаются к коммутаторам и обеспечивают передачу данных по оптическому кабелю.

Для оперативной связи между зданиями установлено оборудование, обеспечивающее связь между операторами в аудио и видео формате.

Нижний уровень СУ ПРГК

Нижний уровень системы управления СУ ПРГК представляет собой сеть распределённых контроллеров, встроенных в электрофизическое и технологическое оборудование. Контроллеры СУ ПРГК объединяются в локальную сеть по стандарту

CAN. Топология сети – магистраль с активными отводами. В одну ветвь локальной сети могут объединяться до 64 контроллеров. Контроллеры СУ ПРГК обмениваются данными по магистрали CAN в соответствии с адаптированной версией протокола CANopen.

Контроллеры источников питания (КИП) принимают две последовательности синхроимпульсов из системы синхронизации ускорителя для таймирования оборудования. Три импульса в каждой последовательности передаются с разной длительностью в стандарте RS-485, что упрощает их декодировку.

Динамическое разрешение (разрешение срабатывания регистрирующей установки ПРГК) вырабатывается каждым контроллером при условии нахождения тока источника в границах допуска. Логические сигналы разрешения в стандарте CAN суммируются в магистральном кабеле так, что доминантный уровень соответствует запрету, а рецессивный – разрешению. Суммарный сигнал динамического разрешения запоминается за 100 мкс до момента вывода пучка и поступает на таймерные каналы запуска эксперимента. Таким образом, экспериментальная установка получит запускающие импульсы, если токи в магнитооптических элементах достигли режимных значений.

Многомодовое волокно на длину волны 850 нм и размерами сердечника 50/125 используется для передачи между технологическими зданиями синхроимпульсов, сигналов динамического разрешения, статусов технологического оборудования. Оптические передатчики TxFO и приёмники RxFO спроектированы для передачи сигналов в полосе частот от постоянного тока до 10 МГц на расстояние до 2 км. Интерфейсная часть плат обеспечивает ввод/вывод сигналов в стандартах CAN, RS-485, TTL или в виде сухого контакта.

Контроллеры источников питания

Контроллер источников питания (КИП) магнитооптических элементов (МОЭ) адаптируется к различным режимам работы источников с помощью изменения программы и настроек параметров. Используются три модификации КИП для разных типов источников питания: импульсных, постоянного тока и источников питания бамп-магнитов.

Центральная часть КИП построена на двух функциональных узлах: микроконтроллере CY8051F060 и программируемой логической схеме XC9572XL. Логическая микросхема обеспечивает декодировку синхроимпульсов ускорителя, таймирование микроконтроллера и формирует сигнал динамического разрешения. Микроконтроллер CY8051F060 имеет развитую периферию. Ток источника измеряют два встроенных 16-разрядных аналого-цифровых преобразователя ADC0 и ADC1. Пороги компараторов динамического разрешения вырабатывают 12-разрядные цифро-аналоговые преобразователи DAC0 и DAC1. Связь с верхним уровнем осуществляется через встроенный интерфейс CAN. Набор программируемых счётчиков микроконтроллера PCA0 используется для измерения временных моментов и генерации таймерных импульсов. Опорное напряжение уставки тока задаёт внешний 16-разрядный цифро-аналоговый преобразователь DAC714, подключённый к микроконтроллеру через порт SPI. В тестовом режиме сигналы внутренних таймеров заменяют внешние синхроимпульсы, что позволяет производить автономную наладку и калибровку контроллера.

Оптроны обеспечивают развязку трёх последовательных каналов связи с верхним уровнем. Каждый контроллер имеет свой собственный источник питания. Полная гальваническая развязка контроллера позволяет его встраивать в технологическое оборудование.

Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) системы управления может быть разделено на 3 основные группы:

- ПО в контроллерах оборудования. Основная задача – непосредственная работа с оборудованием в реальном времени. Как правило, очень редко изменяется.
- ПО в компьютерах переднего края. ПО позволяет: разгрузить контроллеры оборудования от обмена данными с множественными клиентскими приложениями; обеспечить однородный доступ к данным контроллеров оборудования по сети системы управления и скрыть от прикладных программ специфику обмена данными с контроллерами оборудования.

- ПО клиентских компьютеров (операторских консолей). Используется операторами для управления оборудованием или для выполнения служебных задач, обменивается данными с компьютерами переднего края.

Программное обеспечение в контроллерах оборудования

Основные задачи микропрограммы контроллера: обеспечение режима работы источника в реальном времени и поддержка протокола обмена CANopen. Структурно, контроллер содержит набор регистров разного назначения или в терминологии CANopen – Словарь Объектов (Object Dictionary). В Словаре содержатся данные процесса, параметрические данные, а также вся необходимая информация для работы контроллера в сети. Для трёх типов контроллеров источников питания сформирован общий набор объектов Словаря, так называемый стандартный профиль источника. Микропрограмма контроллера взаимодействует со Словарём (записывает и считывает данные), а сервисы CANopen обеспечивают взаимодействие между объектами Словаря разных узлов. В контроллерах реализованы оба механизма обмена данными в сети CANopen: SDO и PDO. Сервис SDO используется для доступа ко всем объектам Словаря по схеме «клиент-сервер», а сервис PDO - для чтения данных процесса в реальном времени (статусы, ток источника, содержание счётчиков). Привязку микропрограммы к циклу ускорителя осуществляют внешние синхроимпульсы, от которых стартуют таймеры микроконтроллера. Окончание работы таймеров, является концом текущего цикла. В паузе микропрограмма считывает результаты измерений в отработанном цикле и заносит в рабочие регистры уставки и другие настроечные параметры на новый цикл. Настроечные параметры контроллера и процесса хранятся в специальной памяти микроконтроллера типа FLASH ёмкостью 128 байт, что обеспечивает сохранность последнего режима после отключения питания.

Программное обеспечение в компьютерах переднего края

В качестве интерфейса компьютеров переднего края с клиентскими компьютерами выбран OPC (OLE for Process Control - семейство программных технологий, предоставляющих единый интерфейс для управления объектами автоматизации и

технологическими процессами) [2]. В одном компьютере переднего края работает один или два сервера OPC.

Каждый сервер OPC отвечает за обмен данными с контроллерами оборудования, преобразование данных от контроллеров в данные физической модели контролируемых устройств и предоставление результатов всем клиентским приложениям по протоколу OPC.

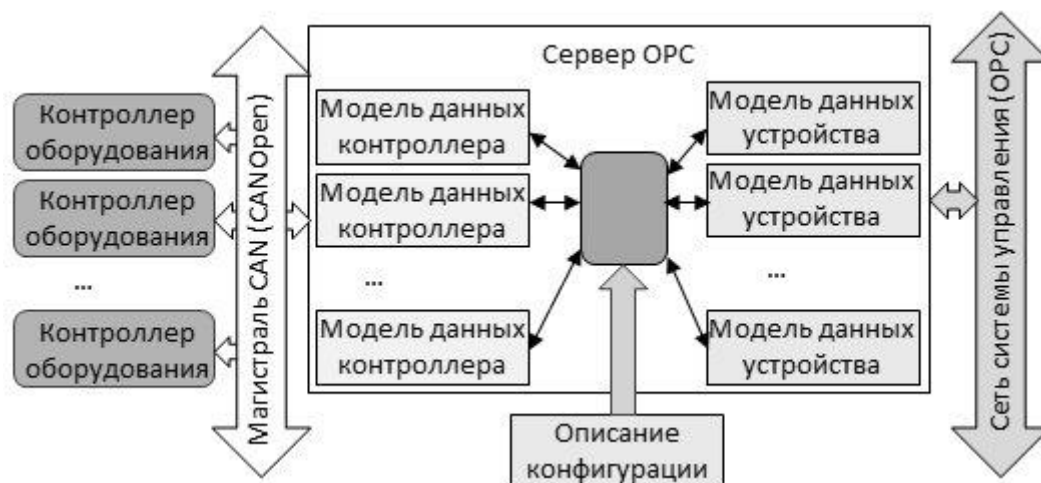


Рис. 2. Структура сервера OPC.

Серверы OPC реализованы как сервисы Windows, они запускаются автоматически при старте компьютера. При старте сервер OPC вычитывает свою конфигурацию из файла и в дальнейшем работает в соответствии с этой конфигурацией. Конфигурация описывает:

- Физические адреса (в магистрали CAN) всех контроллеров, управляемых этим сервером OPC;
- Модель данных всех типов контроллеров оборудования (состав объектов CANopen, доступных в контроллере, их типы данных и правила чтения/записи);
- Модели данных физических устройств, которые должны быть доступны клиентам (имена тегов OPC, их типы данных и права доступа);
- Правила преобразования данных моделей контроллеров в модели данных устройств.

Серверы OPC написаны на языке C++ с использованием библиотеки LightOPC [3].

В настоящее время реализовано два типа серверов OPC:

- Для обмена с контроллерами по магистрали CAN (большинство оборудования, включая источники питания магнитов, вакуумное оборудование и др.)
- Для обмена с контроллерами, реализованными на LabView (устройства диагностики пучка).

Программное обеспечение в консолях операторов

Клиентские программы используют подключение к серверам OPC для доступа к данным моделей оборудования и представляют эти данные в удобном для пользователя виде. Для упрощения работы с серверами OPC из клиентских программ реализована библиотека с использованием .NET, позволяющая скрыть от разработчиков клиентских программ детали обмена по протоколу OPC и распределение устройств по серверам OPC. Для работы с данными оборудования ПРГК требуется лишь знание имени устройства и модели данных соответствующего типа устройства.

На основе этой библиотеки реализовано несколько прикладных программ (ПП) для управления различными типами оборудования ПРГК, в том числе:

- ПП управления источниками питания магнитооптических элементов канала ПРГК. ПП показывает текущее состояние и статистику работы источников питания, позволяет оператору настраивать все уставки источников питания. Имеются два варианта программы: источники питания показаны в виде таблицы, либо в виде синоптики канала ПРГК.
- ПП управления вакуумным оборудованием ПРГК: вакуумная система установки показана в виде синоптики, с измеренными величинами давлений и токов насосов.
- ПП управления пучковым затвором и системой блокировок и сигнализации.
- ПП отображения результатов измерений профилометров пучка

Примеры экранов прикладных программ приведены на Рис. 3.

В дополнение к программам для операторов реализовано архивирование режимов работы оборудования ПРГК в базе данных (на основе той же библиотеки доступа к

серверам OPC) и несколько небольших программ для просмотра архивных данных в том или ином виде.

Прикладные программы

Для примера представлены копии экранов интерфейса пользователя для нескольких прикладных программ.

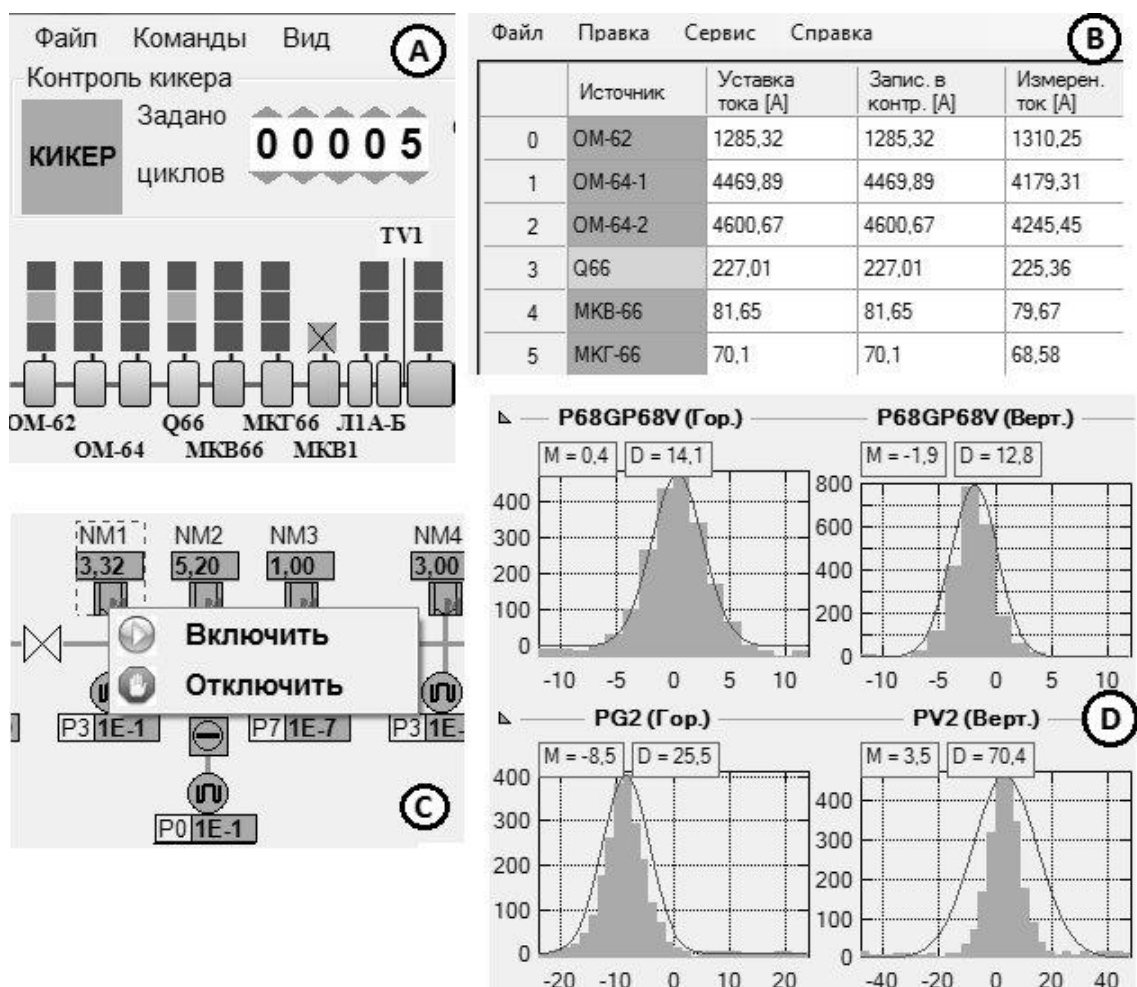


Рис. 3. Примеры пользовательского интерфейса.

На рис.3а показан фрагмент основного интерфейса программы управления источниками питания магнитооптических элементов. Магнитооптическое оборудование канала показано в виде синоптики, символы магнитов расположены в

порядке реального расположения магнитов в канале ПРГК. Над каждым магнитом символически показано состояние источника питания каждого из магнитов: 3 квадратика, окрашенных в соответствии с текущим состоянием источника питания. При нажатии на любой символ источника питания – открывается дополнительная панель со всей доступной информацией по выбранному источнику (ниже синоптики). Из детальной панели можно управлять всеми уставками выбранного ИП.

Кроме синоптики для управления магнитными элементами реализована табличная форма (рис 3б). Она менее информативна, но более компактна и удобна, когда магнитные элементы находятся в рабочем режиме и от оператора требуется лишь настройка или контроль токов.

На рис. 3с изображен фрагмент основного интерфейса программы управления вакуумным оборудованием. Приложение показывает в виде синоптики расположение управляемых элементов вакуумной системы ПРГК вдоль КИ: магнитоэрозийные насосы, датчики измерения вакуума и вакуумные затворы. Цвет символов на синоптике отражает текущее состояние соответствующего элемента оборудования. Для насосов и датчиков давления на синоптике также показана измеренная величина.

Ниже синоптики располагается профиль распределения токов насосов вдоль КИ в виде графика. Реализована также возможность управление магнитоэрозийными насосами (включение/отключение) из меню, появляющегося при выборе насоса на синоптике.

Заключение

Представленная в статье система управления позволяет успешно эксплуатировать протонный радиографический комплекс ИФВЭ. Опыт разработки и реализации показывают, что многоуровневая структура системы управления со стандартными границами позволяет создавать легко конфигурируемую и развиваемую систему с возможностью независимого обновления аппаратных и программных частей по мере появления новых коммерческих продуктов или добавления нового оборудования. Настройка программного обеспечения с помощью данных конфигурации делает

систему гибкой и легко расширяемой. Объектный подход позволил облегчить поддержку и развитие программных компонентов.

Список литературы

- [1] Максимов А.В., Тюрин Н.Е., Федотов Ю.С. Оптическая система протонной облучательной установки на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ.// ЖТФ, том 84, выпуск 9, 2014, с. 132-139..
- [2] OLE for Process Control <http://opcfoundation.org>.
- [3] Библиотека LightOPC, Лаборатория сетевых информационных систем Института проблем информатики РАН <http://www.ipi.ac.ru/lab43/lopc-en.html>.

Рукопись поступила 23 сентября 2014 г.

Атрощенко С. А. и др.

Система управления протонографическим комплексом У-70.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	01.10.2014.	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.	
Печ.л. 1.	Уч.– изд.л. 1,34.	Тираж 80.	Заказ 18.	Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

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

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2014-9,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2014
