



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

Препринт 2024–2

В.П. Воеводин

**Системе управления ускорительного комплекса
У-70 двадцать пять лет**
(история и статус)

Протвино 2024

Аннотация

Воеводин В.П. Системе управления ускорительного комплекса У-70 двадцать пять лет (история и статус): Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2024–2. – Протвино, 2024. – 28 с., 7 рис., библиогр.: 10.

Приведены некоторые факты из истории автоматизации ускорительного комплекса У-70, который был сдан в эксплуатацию в 1967 г. полностью в ручном режиме контроля и управления. Кратко излагаются проектные решения, заложенные в единую систему управления ускорительного комплекса У-70, которая работает с 1998 г. Рассматриваются некоторые вопросы многолетней поддержки системы управления исходя из цикла жизни объекта управления, используемой электронной аппаратуры, вычислительных средств и версий операционных систем. Описывается адаптация СУ к новым техническим средствам и метод интеграции с системами управления, построенными на других принципах, придающий ей статус метасистемы.

Abstract

Voevodin V.P. The control system of the U-70 accelerator complex is twenty-five years old (history and status): NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2024–2. – Protvino, 2024. – p. 28, fig. 7, refs: 10.

Some facts from the history of automation of the U-70 accelerator complex, which was commissioned in 1967 completely in manual control, are presented. The design solutions included in the unified control system of the U-70 accelerator complex, which has been in operation since 1998, are briefly outlined. Some issues of long-term operation of the control system are considered based on the life cycle of the control object, the electronic equipment used, computers and versions operating systems. The adaptation of the control system to new technical means and the method of integration with control systems built on other principles, giving it the status of a metasystem, are described.

Немного из истории автоматизации комплекса У-70

Остающийся и сегодня крупнейшим из действующих ускорителей в России, постоянно развивающийся ускорительный комплекс У-70 эксплуатируется с 1967 г. Комплекс состоял из линейного ускорителя И-100 и кольцевого У-70, а всё управление осуществлялось в ручном режиме. Комплекс представляет собой территориально обширный объект управления с большим числом разнообразных технологических подсистем, часть из которых по разным причинам до сих пор не имеет цифрового управления.

По мере появления вычислительных систем приемлемых размеров и производительности в начале 70-х годов стартовали разработки по автоматизации контроля и управления отдельных технологических подсистем ускорительного комплекса. Первый практический результат цифровизации был получен в 1973 г. посредством применения электронной вычислительной машины (ЭВМ) “Минск-22” и электронной аппаратуры разработки МРТИ АН СССР на ускорителе У-70. Созданная система успешно решала три задачи диагностики пучка протонов с представлением результатов в цифровой форме: измерения орбиты, частот бетатронных колебаний и профиля пучка протонов.

В дальнейшем осуществлялась децентрализованная автоматизация и на различных технологических подсистемах ускорительного комплекса создавались локальные системы управления (СУ) на базе разнообразных доступных ЭВМ и электронного оборудования. Данные разработки значительно интенсифицировались с появлением мини-ЭВМ. Появилось значительное количество аппаратно и программно несовместимых отдельно стоящих СУ.

Когда проектировался новый инжекционный комплекс – линейный ускоритель ЛУ-30, кольцевой У-1.5 (бустер), канал ввода пучка из ЛУ-30 в У-1.5, канал перевода из бустера в

кольцо У-70 – его специфические особенности такие, как время технологического цикла 60мс и пакетный режим работы, привели к новым требованиям по автоматизации ускорителя. На ряде подсистем У-1.5 было принято решение вообще не создавать средств ручного управления. Таким образом, СУ становится одной из неотъемлемых технологических систем ускорителя – остановка системы управления вызывает остановку ускорителя. В МРТИ для СУ инжекционного комплекса разрабатывалась электронная аппаратура АСИУ.

В 1977 г. были приняты принципиальные решения по созданию интегрированной системы управления для У-1.5 с двумя прилегающими каналами:

- Использовать ЭВМ ЕС-1010, которая была наиболее надёжной на тот момент времени.
- Закупать значительный объём ЗИП с целью продления срока жизни ЭВМ.
- Максимально использовать электронную аппаратуру в стандарте СУММА, как более современную в сравнении с АСИУ.
- Все автоматизированные подсистемы должны быть доступны с одного рабочего места оператора.

В этом же году была начата разработка программного обеспечения (ПО). При разработке ПО учитывались два главных требования к СУ:

- работа в режиме реального времени У-1.5;
- возможность одновременного доступа ко всем подсистемам инжекционного комплекса, как минимум, с местного пульта управления бустера и главного пульта управления ускорительного комплекса (ГПУ).

Для решения данных вопросов со стандартным монитором ЭВМ был выполнен комплекс общесистемных работ с целью:

- обеспечить многозадачность (до четырёх задач);
- сделать систему многопользовательской (до четырёх терминалов);
- создать динамическое управление оперативной памятью (размер 64К);
- гарантировать быстрый доступ к аппаратуре СУММА.

В ЭВМ был установлен специально созданный модуль памяти объёмом 64К как внешнее устройство, которая предназначалась для организации внутренней специфической базы данных. Прикладные программы создавались на языке Fortran и были организованы в виде отдельных модулей размера ~8К, которые могли вызывать загрузку друг друга на одно и то же место памяти, что позволило создать достаточно мощную прикладную программную систему. Такая организация требовала гибких средств передачи данных между программами через

внешние носители информации. Использование подключенной внешней памяти и диска 800К с фиксированными головками обеспечивало приемлемое время реакции СУ. В каркасы СУММА устанавливались микро-ЭВМ МЭ-80, а многие модули СУММА содержали внутреннюю память для быстрого обмена данными с технологическим оборудованием. Всё это в совокупности позволяло решать требуемые задачи в реальном времени.

В 1980 г. был осуществлён физический запуск У-1.5, а с 1983 г. ускоритель У-70 начинает работать с новым инжекционным комплексом на постоянной основе. При этом СУ обеспечивала одновременный доступ с четырёх терминалов, расположенных в разных зданиях/помещениях, и одновременное решение до четырёх задач контроля/управления посредством соответствующих параллельно выполняющихся программ.

Лимит на 28 каркасов СУММА, которые можно было подключить к ЕС-1010, был в определённый момент исчерпан. Дальнейшая автоматизация всего комплекса У-70 осуществлялась децентрализованным образом по пути создания локальных систем на базе новых ЭВМ и микро-ЭВМ. Со временем парк используемых на комплексе вычислительных систем стал весьма разнообразен. В результате к началу 90-х годов на ускорительном комплексе ИФВЭ находились в эксплуатации более двух десятков отдельных несовместимых систем управления, построенных на разной технической базе и включающих в себя порядка сотни каркасов электроники в стандарте СУММА и Multibus I, а также десятки различных несовместимых ЭВМ: ЕС-1030, ЕС-1010, МЭ-80, МЭ-86, СМ-1420, СМ-1810, Электроника-60.

Как правило, каждая система, за исключением СУ бустера, имела свой терминал доступа и контролировала одну технологическую подсистему ускорительной установки в пределах одного здания. Каждая прикладная программа имела свой пользовательский интерфейс, ориентированный исключительно на данную технологическую подсистему. Операторы ГПУ по многим вопросам обменивались информацией с местными пультами управления по телефону.

В 1993 г. было принято решение о разработке и создании единой интегрированной системы управления всего ускорительного комплекса У-70. К этому времени уже в течение нескольких лет велись активные работы по проектированию СУ УНК в сотрудничестве с Европейским центром ядерных исследований (ЦЕРН).

Проектные решения единой системы управления комплекса У-70

К началу проектирования новой системы управления был накоплен значительный опыт и понимание проблем автоматизации ускорителей:

- По проекту СУ УНК были серьёзные наработки по аппаратной архитектуре, созданы некоторые системообразующие модули и узлы, изучен опыт ЦЕРН.
- Из опыта автоматизации инжекционного комплекса следовала исключительная важность баз данных для интегрированных систем, поэтому уже несколько лет велась разработка специализированной СУБД реального времени, поддерживающей трехмерные таблицы данных [1].
- Несоизмеримые сроки жизни ускорительного оборудования, электронной аппаратуры и вычислительных систем требуют, чтобы в СУ предусматривалось неоднократное обновление компьютеров при неизменности аппаратных средств.
- Важность совместимости и переносимости программного обеспечения, которые к данному времени начали внедряться в вычислительные системы.

Основная цель проектируемой СУ заключалась в обеспечении равноправного доступа ко всему ускорительному комплексу, как со всех пультов управления ускорительного комплекса, так и из некоторых технологических помещений. Изначально предполагалась длительная эксплуатация системы управления. Основные подходы к проектированию СУ изложены в работе [2].

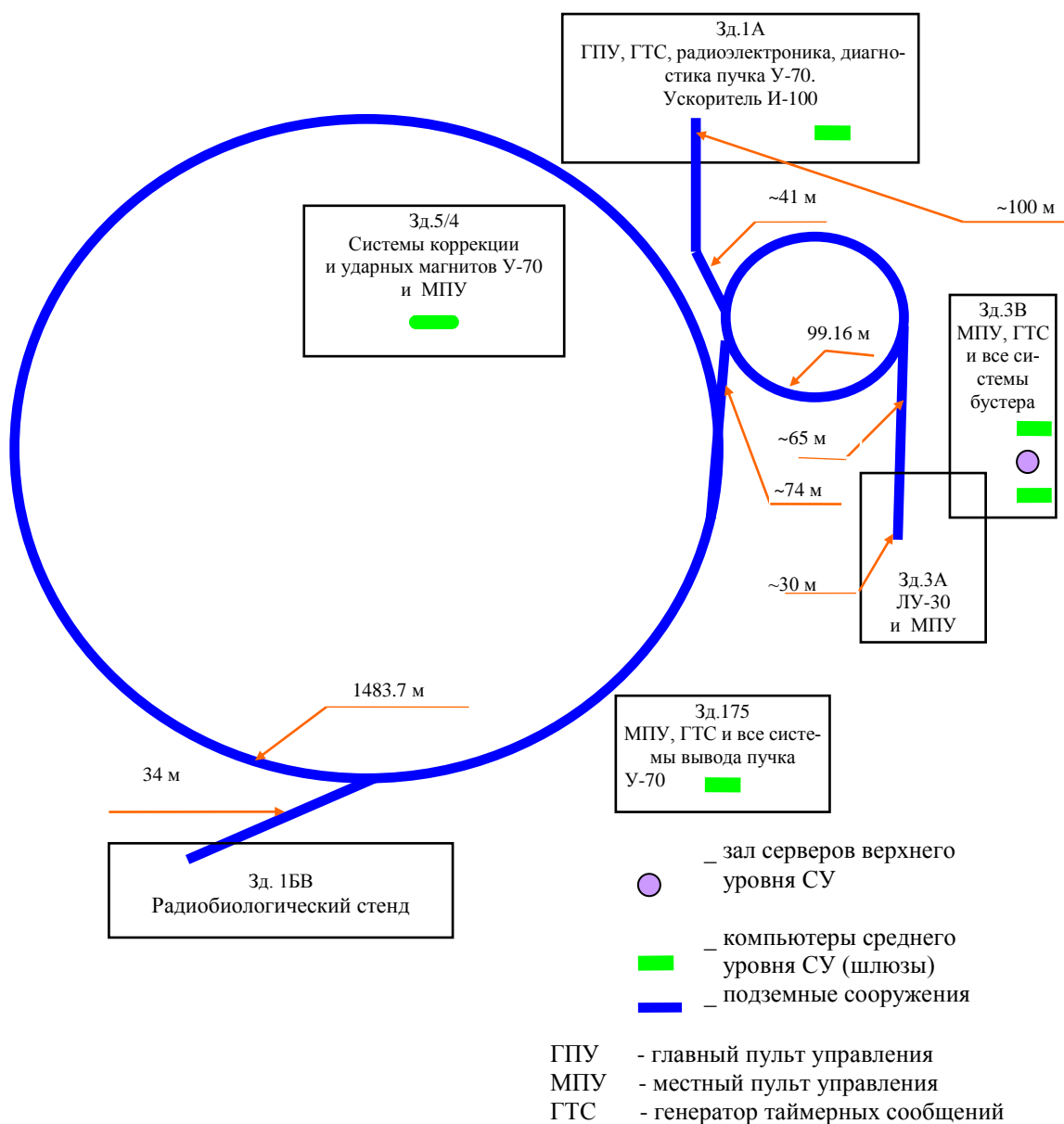


Рис. 1. Схема расположения оборудования СУ в зданиях ускорительного комплекса.

Схема территориального охвата установок и зданий единой системой управления на сегодняшний день представлена на Рис. 1. Полный технологический цикл ускорительного комплекса равен 10с., что определяет темп обновления и обработки в СУ измеряемых данных.

В качестве аппаратной архитектуры была выбрана трёхуровневая программно-аппаратная модель, популярная на тот момент в больших ускорительных центрах – верхний, средний и нижний уровни.

Верхний уровень включает два типа компьютеров, подключаемых к вычислительной сети СУ: серверные и консольные. Серверы обеспечивают общесистемные сервисы, хранение

и обработку данных, вычисления. Все серверы располагаются в одном зале. Консоли являются точками доступа к СУ операторов и специалистов. Консоли устанавливаются на пультах управления и, по необходимости, в некоторых технологических помещениях.

Средний уровень представляют собой компьютеры, выполняющие функции шлюзов между вычислительной сетью Ethernet системы управления и промышленными сетями MIL1553, имеющими топологию многоотводной магистрали. К одному шлюзу возможно подключение до двух сетей MIL1553.

Нижний уровень составляют контроллеры оборудования (КО), представляющие собой произведённые для СУ УНК каркасы Multibus со встроенной в каждый из них микро-ЭВМ МЭ-186, модулем удалённого терминала магистрали MIL1553 и приёмником таймерных сообщений. Только нижний уровень обеспечивается средствами синхронизации с технологическим оборудованием. КО осуществляют синхронизованный с технологическим процессом обмен данными с оборудованием ускорительного комплекса.

Вычислительная сеть системы управления ускорительного комплекса У-70 является закрытой и не имеет выхода в Internet. В первоначальном варианте использовался Ethernet 10BASE2 и 10BASE5.

Верхний и средний уровни системы управления формировались в соответствии с проектными решениями, принятыми для СУ УНК.

Верхний уровень был построен на базе Alpha станций различных модификаций, исходя из требований решаемых задач, с операционной системой DEC Unix или Red Hat Linux. Для среднего уровня были установлены используемые в ЦЕРН каркасы VME с операционной системой LynxOS, разработанными в ЦЕРН контроллерами магистрали MIL1553 с драйвером и поддержкой транспортного протокола QuickData. Нижний уровень сформирован из разработанных в ИФВЭ каркасов Multibus, удалённых терминалов MIL1553, микро-ЭВМ МЭ-186. Для МЭ-186 создана написанная на языке Ассемблер специализированная, многозадачная, многопользовательская операционная система реального времени, она была расширена поддержкой протокола QuickData. Операционная система полностью располагается в ПЗУ микро-ЭВМ.

В СУ предполагалось объединять три типа КО в зависимости от номенклатуры установленных в них электронных модулей (Рис. 2 – на нём не показана общая таймерная сеть):

- в каркас устанавливаются интерфейсные электронные модули сопряжения с оборудованием ускорителя;

- в каркас устанавливается модуль контроля ветви стандарта СУММА (до семи каркасов СУММА);
- в каркас устанавливается контроллер магистрали RS485, к которой подключаются двухпроцессорные микроконтроллеры (МК), встроенные в источники питания. МК включает два микропроцессора – первый взаимодействует с КО и передаёт команды второму, второй является генератором переданных ему функций [3]. Так организовано управление источниками питания У-70 и систем вывода У-70 (СВ), выходной ток которых должен изменяться по некоторому закону в течение цикла ускорителя. Для источников питания инжекционного комплекса из-за жёстких временных требований используются специально разработанные электронные генераторы функций.

Программное обеспечение, в соответствии с аппаратной архитектурой, также распределяется по уровням СУ и используемым вычислительным средствам.

С целью обеспечения синхронизации с технологическим процессом на каждой из установок: инжекционный комплекс, У-70, системы вывода У-70 – должен устанавливаться в соответствующем здании специальный системный КО, называемый генератор таймерных сообщений (ГТС). Все ГТС должны быть связаны между собой специальными коммуникационными средствами, они формируют общую таймерную систему. На каждый ГТС поступают сигналы реперных событий от соответствующей установки, относительно которых ГТС рассылает короткие сообщения по специальной многоотводной магистрали на все приёмники таймерных сообщений контроллеров оборудования данной установки [4]. Таким образом, программное обеспечение нижнего уровня выполняет свои функции синхронно с технологическим процессом ускорительного комплекса.

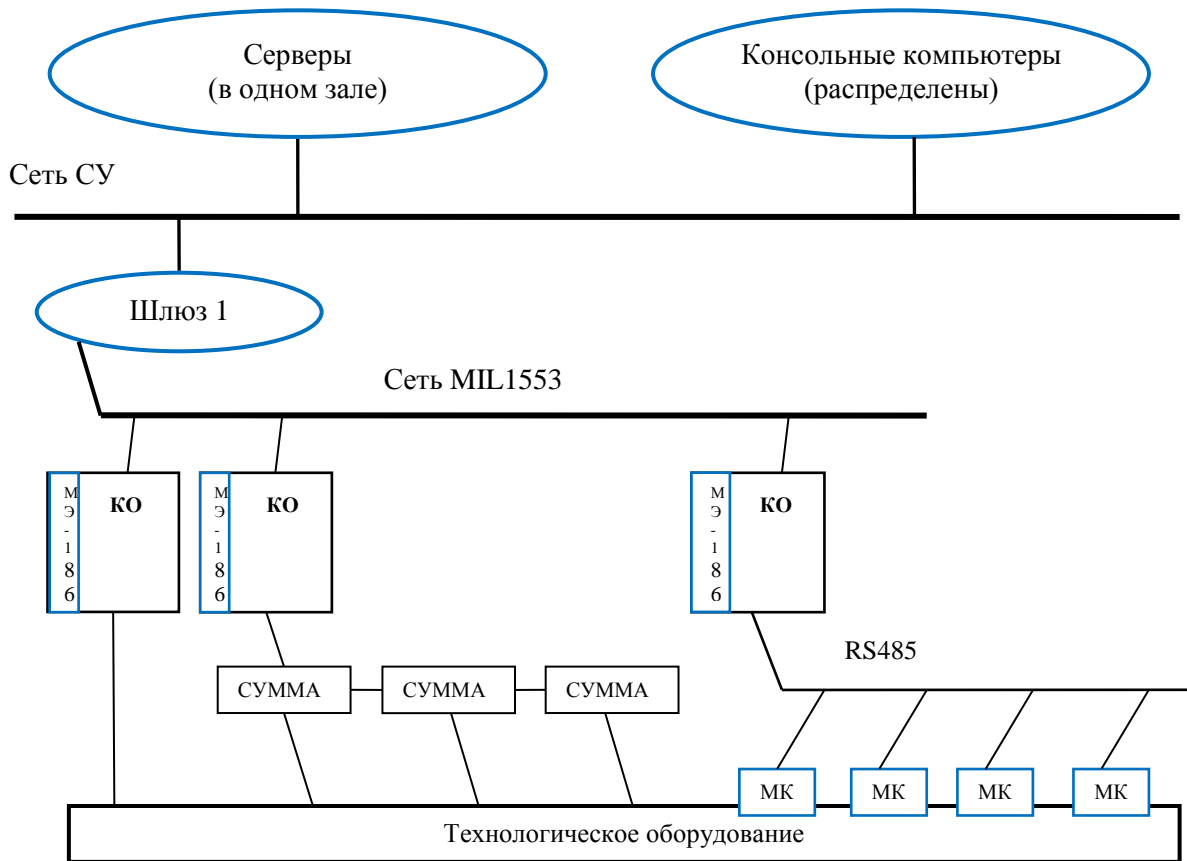


Рис. 2. Трёхуровневая архитектура с одним шлюзом, одной промышленной сетью и со встроенными в оборудование двухпроцессорными микроконтроллерами (МК).

За основу проекта программного обеспечения СУ были приняты базовые системные идеи, появившиеся по результатам создания системы управления инжекционного комплекса на базе ЕС-1010. Главная концепция проектируемого программного обеспечения заключалась в создании единого информационного пространства внутри СУ, которое всегда отображает текущее состояние всех систем ускорительного комплекса. Всё остальное ПО взаимодействует только с элементами информационного пространства системы управления [5]:

- серверы поддерживают единое информационное пространство;
- на серверах выполняются программы обработки данных – исходные данные поступают из информационного пространства, а результаты отправляются в информационное пространство;
- консольные компьютеры, используя специальные описания в базах данных, обеспечивают обмен данными между информационным пространством и человеком;

- ПО КО осуществляет синхронизированный с технологическим процессом обмен данными между информационным пространством и технологическим оборудованием.

Реализация ПО и поддержка СУ комплекса У-70

Ориентация на Unix-подобные системы предопределила использование языка программирования C. Наличие в СУ сильно различающихся систем (DEC Unix, Red Hat Linux и LynxOS) подвигло на применение в системообразующем ПО только тех функций интерфейса ОС, которые полностью совпадали во всех системах. Появление в 2001 г. единой спецификации стандарта POSIX.1 подтвердило правильность этого решения, поскольку созданное ПО легко адаптировалось к базовым интерфейсам API. В дальнейшем это обеспечило достаточно высокий уровень переносимости программного обеспечения на уровне исходного кода.

В целях реализации единого информационного пространства была разработана и создана специализированная система управления распределёнными данными реального времени (ССУДА) [6]. Она обеспечивает поддержку трёхмерных таблиц, распределённых по базам данных на разных серверах. ССУДА поддерживает репликацию определённых таблиц в оперативную память МЭ-186 и поддержку их как части единого информационного пространства. Таким образом, информационное пространство распространяется и на нижний уровень СУ. Информационное пространство является единым, поскольку каждый информационный элемент адресуется координатами: имя таблицы, номер плоскости, номер строки и номер столбца. Определить физическое местоположение информационного элемента – конкретный компьютер и базу данных – может только администратор СУБД.

В тесном сотрудничестве с операторами и физиками ускорителей был разработан и реализован графический пользовательский интерфейс (GUI) на базе графических пакетов X Window, Motif и XRT. Интерфейс представляет собой комплекс взаимосвязанных программ, работа которых не зависит от особенностей ускорительных установок. GUI реализует определённое множество специальных операций над элементами информационного пространства. Один и тот же графический пользовательский интерфейс устанавливается на всех консольных компьютерах.

Единый комплект программ, выполняющихся в шлюзах, обеспечивает взаимодействие верхнего и нижнего уровней системы управления. На базе транспортных протоколов TCP/UDP и QuickData созданы следующие прикладные протоколы:

- загрузка с серверов в КО программ, подготовленных на языке С в Microsoft на персональных компьютерах (ПК);
- загрузка с серверов в КО конфигурационных файлов с описанием подключенных к нему магистралей RS485 и микроконтроллеров;
- загрузка с серверов в оперативную память КО копий требуемых таблиц ССУДА;
- поддержка виртуального терминала КО;
- доступ с верхнего уровня СУ к данным таблиц ССУДА в памяти КО;
- передача на верхний уровень СУ информации об инициализации операционной системы в МЭ-186.

Средний уровень гарантирует передачу сообщений на базе перечисленных протоколов между вычислительной сетью СУ и промышленными сетями МП1553.

Вышеперечисленное программное обеспечение является системообразующим и не зависит от ускорительной установки или технологической подсистемы. Ориентированное на конкретную установку или технологическую подсистему программное обеспечение является прикладным (ППО). Именно ППО является самым объёмным и трудоёмким компонентом ПО СУ. ППО верхнего уровня выполняется на серверах, ППО нижнего уровня выполняется в контроллерах оборудования. ППО нижнего уровня загружается в контроллер оборудования при его инициализации. Во всех МК на постоянной основе хранится копия одной и той же программы, которая получает от КО информацию о генерируемых МК функциях.

Таким образом, при инициализации операционная система КО передаёт на верхний уровень СУ сообщение о своём включении. На верхнем уровне определяется, что необходимо КО для функционирования. В него загружаются копии соответствующих таблиц ССУДА и программы. Прикладная программа в КО при инициализации прописывает данные из таблиц в аппаратуру. Для работы с МК она запрашивает загрузку конфигурационных файлов. В дальнейшем её работа синхронизируется посредством таймерных сообщений от ГТС.

При включении ускорителя он через инициализируемые операционные системы контроллеров оборудования автоматически переводится в последнее состояние, которое было перед его выключением.

К началу реализации новой СУ наиболее критично складывалась ситуация на инжекционном комплексе:

- возраст последней приобретённой машины ЕС-1010 приближался к 15 годам;
- ранее приобретённый ЗИП быстро иссякал;

- выходящие из строя компьютеры разбирались на запчасти;
- для полноценного функционирования ускорителя интегрированная СУ бустера У-1.5 должна была заменяться целиком.

Поэтому параллельно с реализацией системообразующего ПО создавалось ППО инжекционного комплекса, которое ориентировалось на уже использующуюся аппаратуру СУММА, подключенную к ЕС-1010.

Процесс реализации системы управления можно логически представить как расширяющееся множество проходящих по всем уровням архитектуры проблемно-ориентированных вертикальных слоёв. Каждый слой решает отдельную задачу контроля/управления конкретной подсистемы определённой установки. Вертикальный слой включает интерфейсную электронику, контроллер оборудования, программы нижнего уровня, программы верхнего уровня и относящиеся к решаемой задаче параметры в информационном пространстве. Такой подход позволяет одновременно параллельно решать разные задачи в рамках одной системы.

В 1998 г. новая система управления была передана в эксплуатацию [7], а последняя ЕС-1010, отработавшая почти 20 лет, демонтирована. На тот момент СУ включала один шлюз, порядка 15 КО и охватывала ускоритель У-1.5 с двумя каналами.

В дальнейшем система управления масштабировалась путём расширения множества вертикальных слоёв на другие установки в рамках принятых проектных решений. В 2003 г. весь ускорительный комплекс У-70 управлялся единой интегрированной СУ. Система управления включала пять шлюзов, расположенных в четырёх зданиях, около 40 КО, порядка 200 встроенных микроконтроллеров, более 20 старых каркасов аппаратуры СУММА. К этому моменту общие трудозатраты на разработку и реализацию всего программного обеспечения превысили объём в 100 человеко-год.

Ускорительный комплекс развивался и к 2007 г. на нём стали ускорять ионы углерода. Для работы с ионами были введены в эксплуатацию линейный ускоритель И-100 и канал ввода ионов в У-1.5. Система управления была масштабирована на ионный канал в рамках проектных решений.

Адаптация системы управления к новым техническим возможностям

По мере эксплуатации СУ становились доступными новые сетевые и вычислительные средства с расширенными возможностями. К 1999 году характеристики персональных компьютеров (ПК) сравнялись с производительностью используемых в СУ Alpha станций. По-

явился Ethernet с принципиально новыми характеристиками (100BASE-TX, 1000BASE-T), которые открывали обширные горизонты для дальнейшего развития системы управления.

В 2002 г. вышла из строя первая Alpha станция, не проработав и 10 лет. Встал вопрос о дальнейшей судьбе компьютеров верхнего и среднего уровня СУ и переносе наработанного ПО на новые вычислительные средства.

Серверы на базе Alpha станций были заменены на совместимые с ПК серверы с операционной системой Linux проекта Fedora. В качестве консольных компьютеров используются ПК с Linux Fedora, обеспечивающие полноценный доступ к СУ из разных зданий и помещений.

Графический пользовательский интерфейс был полностью переделан с использованием поставляемого с операционной системой графического пакета GTK+. В настоящее время реализация GUI представляет собой пакет из десяти взаимосвязанных многопоточных программ на языке C, которые реализуют определённый фиксированный набор операций над объектами информационного пространства. Пользовательский интерфейс устанавливается на каждый консольный компьютер и автоматически обновляется при запуске, если на файловом сервере появилась его обновлённая версия.

Консоли с графическим пользовательским интерфейсом формируют унифицированную интерактивную среду системы управления, которая взаимодействует исключительно с информационным пространством и независима от ускорительных установок и других программно-аппаратных средств СУ. Все консоли функционально равнозначны независимо от их месторасположения.

Развитие технологий всемирной паутины и переход на новые сетевые средства способствовали принятию решения о создании сайта ускорительного подразделения. Сайт на базе ОС Linux Fedora располагается в открытой сети и получает информацию из СУ посредством специальных средств. На сайте в графической форме в режиме реального времени отображается информация о важных параметрах работы ускорителей и систем. Специалисты имеют возможность из дома наблюдать за работой ускорительного комплекса У-70 и оперативно консультировать дежурный персонал. Дополнительные задержки при доставке информации из СУ приводят к тому, что через браузер пользователь видит только два обновления данных из трёх. Но это не является критичным. Аналогичный сайт имеется и в закрытой сети СУ с дополнительными возможностями просмотра всех действий, выполненных любым оператором с любой консоли в системе управления за длительный период времени.

Вычислительные средства среднего уровня на базе каркасов VME были заменены на промышленные персональные компьютеры (промПК) с закупленными контроллерами магистрали MIL1553. Контроллеры были поставлены с драйвером для ОС Linux Fedora и библиотекой доступа к магистрали. Программное обеспечение среднего уровня было адаптировано к передаче пакетов QuickData посредством функций поставленной библиотеки и не потребовало изменений ПО нижнего уровня.

Таким образом, верхний и средний уровни системы управления в конечном итоге стали базироваться на однородных вычислительных и операционных системах [8].

Следует отметить сроки жизни отдельных объектов и их влияние на функционирование системы управления:

- ускорители - эксплуатируются десятки лет (У-70 с 1967 г., У-1.5 с 1983 г.), при этом они модернизируются и совершенствуются, но, как правило, не требуют кардинальных проектных изменений системы управления;
- электронная аппаратура - зачастую работает до полного износа и исчерпания ЗИП (СУММА эксплуатируется с конца 1970-х, Multibus с 1980-х), что требует при модернизации и развитии СУ учитывать длительные сроки её эксплуатации;
- компьютеры - выходят из строя через 10-15 лет, а их замена требует переноса большого объёма разнообразных программ;
- операционные системы Fedora - обновляются дважды в год, возникает вопрос, следует ли и когда, переходить на новые версии. Перенос сотен тысяч строк программного обеспечения, созданного солидные годы тому назад и надёжно в непрерывном режиме без сбоев работающего месяцами, является задачей далеко не тривиальной.

На серверах накоплены и хранятся в исполняемом и исходном (сотни тысяч строк) коде сотни разнообразных программ, созданных при реализации и длительной эксплуатации системы управления. Львиную долю составляют прикладные программы, реализующие специфические алгоритмы обработки данных, учитывающие особенности уникального оборудования ускорительных установок и электронной аппаратуры. Чем дольше срок эксплуатации, тем больше такой soft “твердеет” и постепенно превращается в “hard”. С уходом разработчиков и специалистов, знающих специфику и особенности обработки данных, любая необходимость изменений исходного кода превращается зачастую в неразрешимую проблему. В случае такой необходимости встаёт вопрос выбора решения, при этом учитываются сложность и объём проблемы:

- либо модернизировать имеющиеся исходные тексты программ, при этом изучая реализованные в них алгоритмы, с не всегда предсказуемым сроком исполнения и результатом;
- либо переходить на новую аппаратуру с разработкой новых алгоритмов и программ.

Поскольку система управления является неотъемлемой частью ускорительного комплекса, т.е. её остановка вызывает остановку ускорителей, то цена простоя СУ очень высокая. Особенно во время сеансов ускорительного комплекса, которые длятся в среднем два-три месяца в круглосуточном режиме. Между сеансами без работающей СУ невозможно проводить многие регламентные и наладочные работы на технологическом оборудовании. Поэтому серверы работают круглосуточно без выключений. Консоли, шлюзы и контроллеры оборудования потребители включают/выключают по своим потребностям.

Соответственно, любые изменения в системе управления проводятся с минимизацией остановки СУ. Используются такие способы модификации старых или внедрения новых аппаратно-программных элементов системы управления, которые не вызывают длительной остановки СУ. В сеанс работы ускорительного комплекса система управления входит всесторонне проверенной и гарантированно надёжно работающей.

При выходе из строя сервера требуется перенос на новый компьютер:

- общесистемного ПО, которое поддерживает единое информационное пространство СУ на данной машине;
- баз данных ССУДА, хранящихся на данной машине;
- прикладного ПО, которое осуществляет обработку данных и выполняется на этой машине.

Процессоры нового и вышедшего из строя компьютера должны быть совместимы по двоичному представлению данных. Тогда файлы баз данных безболезненно переносятся на любую версию операционной системы.

Для любого программного обеспечения наилучшим решением является установка той же версии операционной системы, что была на компьютере, вышедшем из строя. Как правило, это сильно устаревшая версия и может конфликтовать с новым типом процессора и chipset.

При необходимости установки более новой версии ОС возникают следующие вопросы:

- совместимость на уровне исполняемого кода – в этом случае нет проблем с переносом программного обеспечения;

- совместимость на уровне исходного кода – в этом случае требуется компиляция и сборка всего ПО;
- несовместимость на уровне исходного кода – при компиляции выясняется, что какие-то функции устарели и больше не поддерживаются. Требуется редактирование исходных текстов;
- многие программы, в зависимости от решаемой задачи, должны выполняться на разных компьютерах, что ставит вопрос о согласовании версий операционных систем на уровне серверов.

При выходе из строя консольного компьютера следует устанавливать версию ОС, для которой на файловом сервере есть соответствующая версия GUI. Графический пакет GTK+ обновляется и практически каждая его новая версия требует серьёзного редактирования исходного кода пользовательского интерфейса. После 15 лет эксплуатации на файловом сервере хранятся две версии GUI (GTK 2 и GTK 3) для разных версий ОС.

Архитектурные изменения СУ в современных условиях

Принятые когда-то проектные решения по трёхуровневой архитектуре СУ давно морально устарели, а развитие системы управления в этом направлении со временем естественным образом стремится к нулю. Появились принципиально новые технические средства, которые приводят к кардинальному изменению взгляда на архитектуру и организацию систем управления.

Появление на рынке комплектующих высокой степени интеграции, контроллеров со встроенным сетевым интерфейсом, множества разнообразных электронных модулей в разных стандартах, технологического оборудования со встроенными средствами управления привели к появлению на отдельных технологических подсистемах комплекса У-70 локальных систем управления на базе новых технических средств. Как и в 1980-х годах возродилась тенденция децентрализованной автоматизации ускорительного комплекса, но на новом уровне технических и коммуникационных возможностей.

Появились как коммерческие, так и свободно распространяемые большие программные пакеты, анонсируемые в качестве готовой среды для быстрого создания различных систем управления (LabVIEW, Vsystem, EPICS, TANGO). Как правило, они включают базу данных, в которой описывается объект управления в терминах логических устройств/каналов; среду разработки приложений; средства создания интерфейсов логических устройств/каналов с ре-

альным оборудованием; инструментарий подключения логических устройств/каналов к графическим элементам пользовательского интерфейса.

Выше перечисленные новые вычислительные, коммуникационные, программные возможности, облегчающие и ускоряющие создание систем управления, привели к появлению разнообразных СУ и в других крупных ускорительных центрах. С неизбежностью возникла необходимость в поиске решений, которые позволяли бы концентрировать реальные и расчётные данные, получаемые из разных систем (например, EPICS, LabVIEW и MATLAB в DESY) с целью их совместной обработки для оптимального функционирования большого ускорительного комплекса. Одно из решений на базе объектно-ориентированного подхода представлено в работах [9, 10].

В 2015 г. для синхротрона У-1.5 был создан новый задающий генератор со своей системой управления на базе промПК. Поскольку это одна из важнейших подсистем ускорителя, то встал вопрос об интеграции её с СУ. Чтобы операторы могли работать в привычной для себя интерактивной среде, для успешного функционирования инжекционного комплекса необходимо было обеспечить полноценное взаимодействие с этой системой по целому ряду важнейших параметров, полностью контролируемых промПК.

Был начат поиск решения по интеграции в СУ ускорительного комплекса У-70 локальных систем управления, построенных на базе новых технических и вычислительных средств. Предлагалось любую другую СУ независимо от того, сколько вычислительных систем входит в её состав, объединять с действующей системой управления комплекса У-70 через единственную вычислительную машину.

С точки зрения аппаратной архитектуры СУ интегрируемый в неё новый вычислительный объект является контроллером оборудования, поскольку является источником значений определённого числа параметров и взаимодействует с конкретной технологической подсистемой ускорительного комплекса. Так же, как и КО, он территориально удалён и его включают/выключают в любой момент времени без согласования с системой управления. В то же время он обладает принципиальными особенностями:

- он подключается непосредственно к вычислительной сети СУ – в обмене данными исключается участие шлюза и промышленной сети;
- он не является абонентом общей таймерной системы – синхронизация с технологическим процессом осуществляется собственными локальными средствами;

- считается, что всё программное обеспечение выполняется в нём – нет относящегося к конкретной технологической подсистеме прикладного программного обеспечения верхнего уровня на серверах СУ;
- со стороны СУ он является высокоинтеллектуальным контроллером оборудования, так как доступ ко всему технологическому оборудованию осуществляется в аппаратной архитектуре под его контролем.

Поэтому такой вычислительный объект был назван станцией контроля оборудования (СКО), объединение которого с системой управления комплекса У-70 приводит к новой архитектуре СУ.

В то же время, технологические параметры, коды обмена с аппаратурой, вычисляются внутри станции контроля оборудования, соответственно, нет необходимости доставки их на уровень серверов. Также СКО инкапсулирует тестирование и наладку оборудования средствами локальной системы, что освобождает верхний уровень СУ от поддержки этих задач. Поэтому в пользовательском интерфейсе должно быть известно, что работа ведётся с данными из СКО и, соответственно, не должны отображаться элементы интерфейса, связанные с технологическими параметрами и нижним уровнем СУ.

При этом новые элементы должны совмещаться со старой трёхуровневой архитектурой, находящейся в эксплуатации. Что касается обновлённой архитектуры, то может быть четыре типа СКО, как это отображено на Рис. 3:

1. СКО является встроенным в технологическое оборудование контроллером с сетевым интерфейсом;
2. СКО есть вычислительная система, непосредственно связанная с электронной аппаратурой, которая осуществляет доступ к технологическому оборудованию;
3. СКО взаимодействует с локальной системой управления, все вычислительные средства которой подключены к вычислительной сети СУ У-70;
4. СКО взаимодействует с локальной системой управления, которая построена на своей отдельной сети. В этом случае СКО имеет два сетевых интерфейса, подключенных к двум сетям разных систем управления.

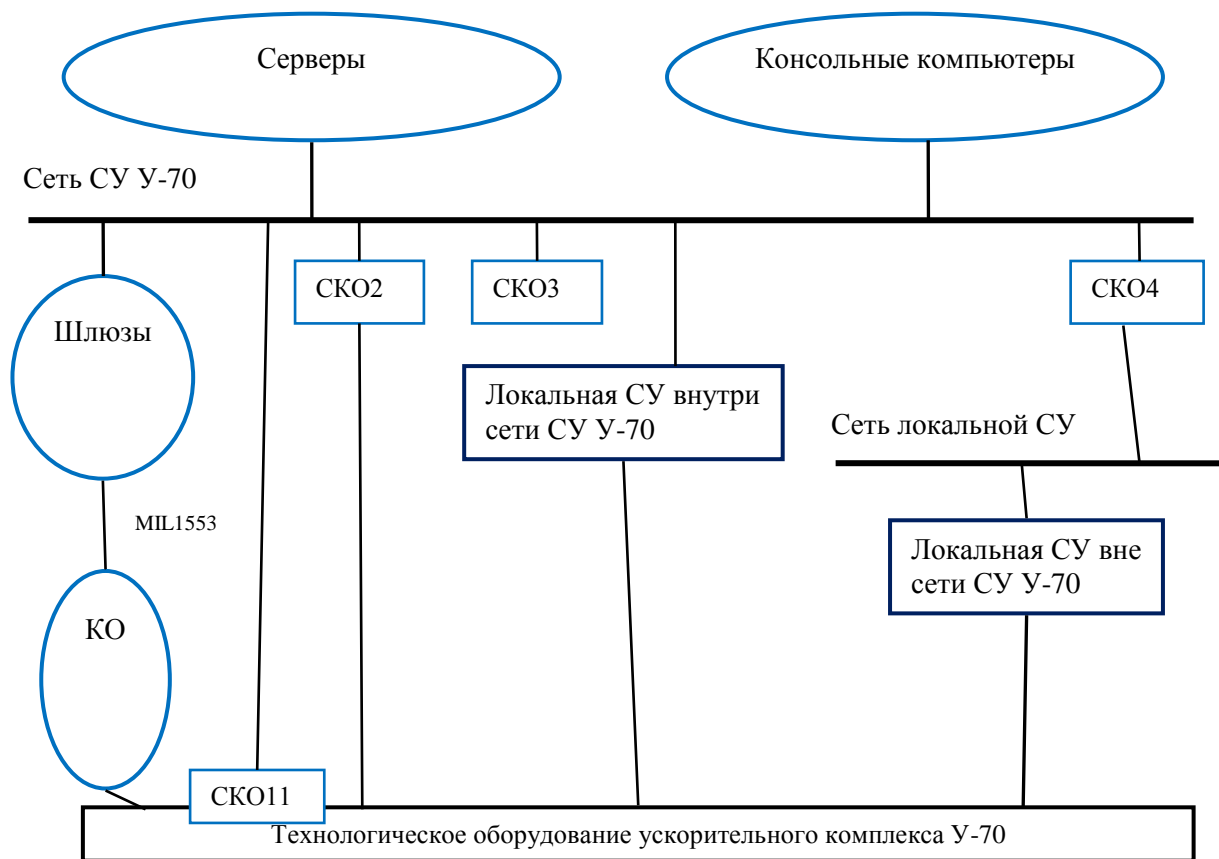


Рис. 3. Архитектура с четырьмя возможными типами станций контроля оборудования.

В то же время станция контроля оборудования является самостоятельной логически завершенной системой управления:

- у неё существуют свои средства синхронизации с технологическим процессом;
- она взаимодействует с технологическим оборудованием, синхронизируясь с технологическим процессом ускорительного комплекса;
- содержит полный комплект программного обеспечения – сбор информации, обработка данных, контроль состояния оборудования и управление оборудованием;
- возможно наличие своих средств локального интерфейса с пользователем;
- обеспечивает тестирование и наладку оборудования в локальном режиме.

Можно выделить несколько причин, которые потребуют интеграцию локальных систем управления посредством СКО в единую систему управления комплекса У-70:

- обеспечить оперативному персоналу возможность работы в унифицированной интерактивной среде единого пользовательского интерфейса СУ;

- использовать встроенный в СУ комплекса У-70 инструментарий архивирования и восстановления режимов работы установок и подсистем;
- существует необходимость совместной обработки или отображения информации, которая циркулирует в локальной системе управления и в СУ ускорительного комплекса;
- локальной системе управления необходимы данные из СУ ускорительного комплекса для вычислений и моделирования.

Были определены требования и условия возможности организации взаимодействия СУ комплекса У-70 и независимых локальных систем управления. Интеграция станции контроля оборудования в систему управления ускорительного комплекса У-70 должна выполняться по двум направлениям:

- интеграция на физическом уровне;
- интеграция на логическом уровне.

Для интеграции на физическом уровне необходимо и достаточно выполнить два условия для станции контроля оборудования:

- физическое подключение СКО к закрытой вычислительной сети СУ;
- СКО должна выполняться под управлением любой Unix-подобной операционной системы.

Для интеграции на логическом уровне достаточно включить СКО в единое информационное пространство СУ. Полноправное включение вычислительной системы в единое информационное пространство подразумевает следующее:

- вычислительная система СКО должна быть описана в едином информационном пространстве с разрешением для неё хранения данных и доступа к базам данных ССУДА;
- все данные, которыми обмениваются СКО и СУ, должны храниться в базах данных ССУДА;
- каждый физический параметр, связанный с СКО, оформляется в соответствии с правилами единого информационного пространства по хранению, организации данных и по взаимодействию с унифицированной интерактивной средой;
- должны быть программные средства, которые обеспечивают обновление на экране консолей измеренных данных каждый цикл ускорительного комплекса;

- должны быть программные средства, которые передают новые значения управляющих параметров от оператора с консоли до аппаратуры.

Взаимодействие станции контроля оборудования и системы управления комплекса У-70 заключается в организации и обеспечении прохождения двух потоков данных: восходящего и нисходящего. Восходящий поток представляет собой значения измеренных и обработанных в СКО данных, частота их обновления соизмерима со временем цикла ускорительного комплекса. Нисходящий поток представляет собой передачу новых значений: управляющих параметров, введённых с консоли оператором ускорителя; при восстановлении режима из архива. Передачи в этом направлении инициируются человеком вводом новых значений управляющих параметров или запросом восстановления определённого режима работы установки со стороны консолей. Вся информация обоих потоков в обязательном порядке проходит через базы данных ССУДА.

Была разработана принципиальная схема организации программно-информационных объектов в СКО, которая обеспечивает логическую интеграцию станции контроля оборудования в систему управления посредством подключения к единому информационному пространству. Она достаточно универсальна и ориентирована на все типы СКО. Схема представлена на Рис. 4.

В соответствии с требованиями СУ каждая СКО должна быть приписана к одной из ускорительных установок, с выбора которых начинается взаимодействие оператора с системой управления при решении своих конкретных задач. Последовательность шагов в работе оператора для определения решаемой им задачи такова: в дереве меню он осуществляет выбор установки, выбор технологической подсистемы, выбор задачи оператора. Каждая задача оператора характеризуется набором измеряемых и управляющих параметров, значения которых отображаются в табличной форме на экране консоли. Далее оператор использует имеющийся в его распоряжении универсальный набор операций над содержимым таблицы.



Рис. 4. Схема организации логической интеграции СКО в СУ У-70.

Одно из основных требований к логической интеграции заключалось в минимизации необходимых изменений ПО при её реализации на разных СКО. В основе схемы лежат следующие архитектурные объекты:

- постоянно выполняющаяся в СКО связная программа, полностью инкапсулирующая связь с единым информационным пространством;
- разделяемая память для организации взаимодействия связной программы с прикладным программным обеспечением СКО;

- оперативная база данных двумерных таблиц в разделяемой памяти для организации значений параметров СКО в стиле единого информационного пространства;
- библиотека функций доступа к оперативной БД и взаимодействия связанной программы с прикладным ПО СКО.

Связанная программа загружается вместе с операционной системой станции контроля оборудования и при инициализации использует конфигурационные файлы, что снижает её зависимость от особенностей СКО. Конфигурационные файлы указывают таблицы в распределённых базах данных ССУДА, для первых плоскостей которых необходима репликация в оперативную БД в разделяемой памяти СКО. Также они увязывают параметры в СКО с задачами оператора, при решении которых значения параметров из данной станции оборудования должны отображаться в соответствующих экранных таблицах консолей.

При инициализации связанная программа, используя конфигурационные файлы, выполняет подготовительные работы:

- определяет в едином информационном пространстве наличие и размер требуемых таблиц;
- резервирует разделяемую память необходимого размера;
- размечает оперативную базу данных в разделяемой памяти;
- выделяет в разделяемой памяти дополнительные элементы с целью синхронизации своей работы с прикладным ПО СКО и с обновлениями данных в едином информационном пространстве СУ;
- копирует данные из первых плоскостей таблиц ССУДА в таблицы оперативной БД;
- сообщает СУ о подключении к единому информационному пространству нового СКО, относящегося к соответствующей установке.

В дальнейшем связанная программа обеспечивает синхронизацию данных в оперативной БД и едином информационном пространстве, путём реагирования:

- в восходящем потоке на обновление измеренных данных в СКО;
- в нисходящем потоке на обновление управляющих данных в едином информационном пространстве.

Библиотека подпрограмм обеспечивает простой доступ к данным таблиц оперативной базы данных в разделяемой памяти. Кроме того она позволяет фиксировать обновления в восходящем и нисходящем потоках данных. Есть возможность передачи в систему управления комплекса У-70 сообщений об ошибках и сбоях в СКО.

В соответствии с разработанной схемой к настоящему времени в систему управления ускорительного комплекса У-70 интегрировано девять станций контроля оборудования. Они базируются на разных вычислительных средствах и используют различные версии операционных систем, в частности Debian и Scientific Linux.

Каждый раз основной объём работы по интеграции новой СКО выполняется на верхнем уровне СУ, в серверах: расширение единого информационного пространства в соответствии с его правилами, создание конфигурационных файлов. Исходный код связанной программы при переносе на каждую новую СКО требует незначительной модификации, а библиотека переносится практически без каких-либо изменений.

В раздел дерева меню системы управления для работы с бустером включены две станции контроля оборудования:

- задающий генератор синхротрона У-1.5 на базе промышленного ПК;
- система управления амплитудой ВЧ синхротрона У-1.5 на базе ARM контроллера.

В раздел дерева меню СУ для работы с ускорителем У-70 включены пять станций контроля оборудования:

- система измерения магнитного поля синхротрона У-70 на базе ARM контроллера;
- система управления В-таймером синхротрона У-70 на базе ARM контроллера;
- система управления Т-таймером и имитатор магнитного цикла синхротрона У-70 на базе ARM контроллера;
- управление широкополосной системой подавления бетатронных колебаний синхротрона У-70 на базе ARM контроллера;
- система измерения орбиты синхротрона У-70 на базе ARM контроллера – 16 измерений за цикл в 60 точках кольцевой трассы пучка.

В разделе систем вывода дерева меню СУ добавлены две станции контроля оборудования:

- система управления кристаллическими дефлекторами – отдельная локальная система, подключенная к закрытой сети СУ У-70;
- система управления радиобиологического стенда (РБС) – отдельная локальная система со своей вычислительной сетью.

Расширенное единое информационное пространство интегрирует и единообразно структурирует данные, источниками которых являются как контроллеры оборудования, так и станции контроля оборудования. Появляется возможность представления полного состояния

систем ускорительного комплекса, используя информацию из разных локальных систем управления.



Рис. 5. Орбита пучка протонов в У-70 и кристаллические дефлекторы.

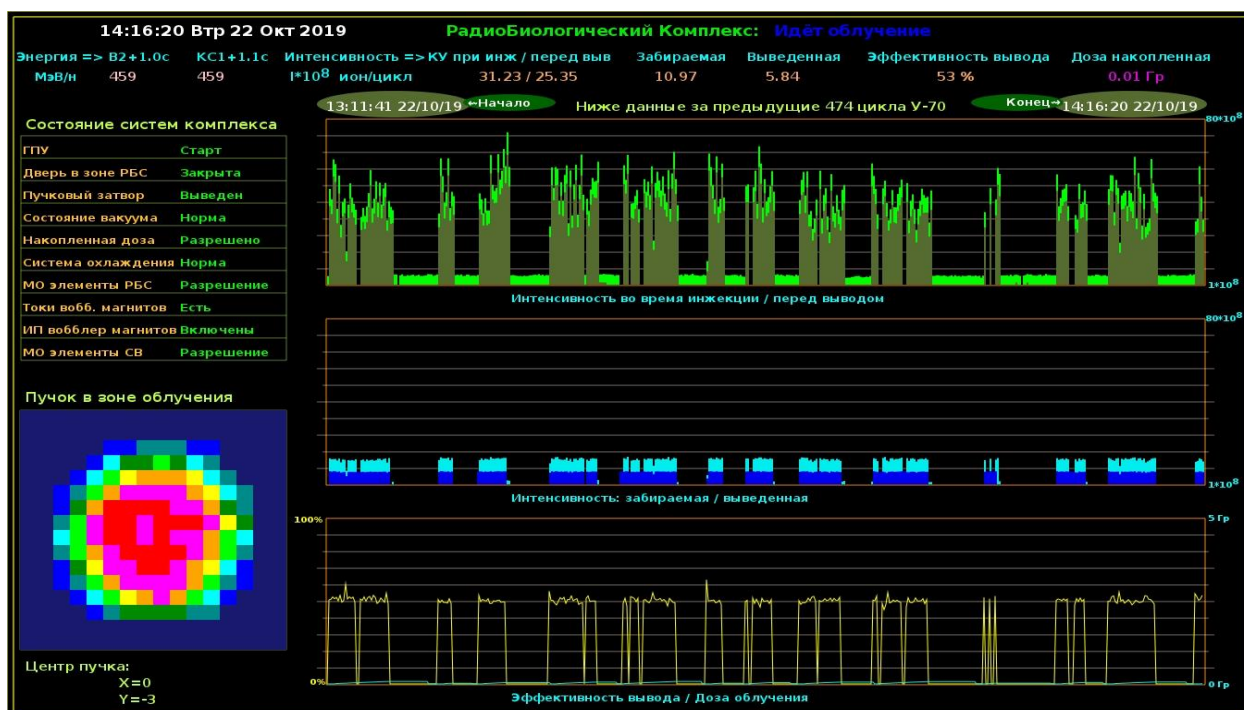


Рис. 6. Идёт процесс облучения ионами углерода на установке РБС.

На Рис. 5 представлены результаты измерения и результаты обработки данных орбиты пучка протонов в кольце У-70 с дополнительной информацией о расположении и состоянии кристаллических дефлекторов. Для подготовки данной картинки использована информация из трёх станций контроля оборудования.

На Рис. 6 представлено информационное табло с полной информацией о состоянии блокировок и разрешений вывода пучка ионов углерода, а также о текущих значениях основных технологических параметров работы РБС. Представленная на рисунке информация получена из трёх станций контроля оборудования и одного контроллера оборудования, относящихся внутри СУ к разным ускорительным установкам (У-1.5, У-70, СВ).

Таким образом, проектные решения по единому информационному пространству и независимому от ППО пользовательскому интерфейсу, когда-то заложенные в систему управления, позволяют и через 25 лет эксплуатации, во-первых, поддерживать её живучесть и, во-вторых, адаптировать в неё другие системы управления, построенные на разнообразных современных технических средствах.

Новые возможности системы управления изменили значимость направления её развития от расширения множества вертикальных слоёв в сторону интеграции различных систем, что свойственно метасистемам. Это приводит, соответственно, к изменению взгляда на логическое представление СУ от множества проблемно-ориентированных вертикальных слоёв к горизонтальной трёхслойной организации, где два верхних слоя независимы от особенностей объекта управления, а нижний слой состоит из разных систем управления, ориентированных на конкретные установки и подсистемы. Текущую организацию всей системы управления ускорительного комплекса У-70 в целом можно схематично представить в трёхслойной форме (Рис. 7), где:

- Верхний слой представляет собой самостоятельную распределённую унифицированную интерактивную среду на базе пользовательского интерфейса консолей. К настоящему времени в различных зданиях на пультах управления и в технологических помещениях располагается порядка двадцати консолей, на которых установлен единый пакет пользовательского интерфейса. Данный слой взаимодействует только и исключительно со средним слоем. На каждой консоли одновременно можно открыть до восьми таблиц с числовыми данными с целью просмотра и редактирования, а также неограниченное число табло и графиков, автоматически генерируемых в недрах СУ по результатам работы ускорительного комплекса в каждом цикле.

- Средний слой является единым информационным пространством системы управления ускорительного комплекса У-70, формируемым множеством трёхмерных таблиц распределённых баз данных ССУДА. Информационное пространство отображает текущее состояние ускорительного комплекса и при расширении СУ пространство расширяется соответствующим числом параметров, организованных и описанных по определённым правилам. Изображение на Рис.1 можно рассматривать как проекцию единого информационного пространства СУ на географическое пространство. К настоящему времени число таблиц стабилизировалось в районе 2000.
- Нижний слой включает вертикальные слои старой трёхуровневой архитектуры, а также взаимодействующие со средним слоем через станции контроля оборудования новые системы управления. Расширение СУ осуществляется либо добавлением новых вертикальных слоёв в старую архитектуру, либо добавлением новых СУ через СКО. Интегрированные в систему управления СКО разнообразны по используемым вычислительным средствам, аппаратной архитектуре и применяемым Unix-подобным операционным системам.



Рис. 7. Трёхслойное представление текущей организации СУ.

Можно констатировать тот факт, что на концепции единого информационного пространства с унифицированной интерактивной средой сформирована открытая для расширений метасистема, объединяющая в настоящее время десять самостоятельных систем управления.

Список литературы

- [1] В.П.Воеводин, А.Ф.Детиненко, В.И.Ковальцов, В.И.Пузынин. - Специализированная система управления данными для быстрых технологических процессов. - М: Наука, “Программирование”, N5, 1989, стр.91.
- [2] V.Komarov, A.Sytin, E.Trojanov, V.Voevodin, V.Yurpalov, - Upgrade of the U-70 complex controls. - Proceedings of the ICALEPCS'95, Chicago, Illinois, USA, 1995, V.2, p.930.
- [3] С.И.Балакин, В.П.Воеводин, А.А.Инчагов, В.В.Комаров. - Архитектура встроенных микроконтроллеров в системе управления комплекса У-70. - XVII совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 2000, т.1, стр. 319-321.
- [4] G.Antonichev, L.Kim, V.Komarov, V.Kokovin, N.Krotov, V.Kuznetsov, Yu.Milichenko, N.Radomsky, V.Voevodin. - Modernization of U-70 general timing system. - Proceedings of the ICALEPCS'2005, Switzerland, Geneve, 2005.
- [5] V.Voevodin. - Software Architecture of the U-70 Accelerator Complex New Control System - Proceedings of the ICALEPCS'99, Trieste, Italy, 1999, p.457.
- [6] В.П.Воеводин. - ССУДА - Специализированная Система Управления распределёнными Данными реального времени. - XVI совещание по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1998, т.1, стр. 135.
- [7] В.П.Воеводин, В.В.Комаров, Ю.В.Миличенко, Ф.Перриолла. - Система управления ускорительным комплексом У-70. – “Приборы и Системы Управления”, №6, 1999, стр.1-4.
- [8] В.П.Воеводин. - Управление ускорительным комплексом в среде Linux - Москва, “НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ”, “Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика”, №12, 2008, стр.1-9.

- [9] A.Aghababyan, R.Bacher, P.Bartkiewicz et al. – The large scale European XFEL control system: overview and status of the commissioning. - Proceedings of the ICALEPCS'2015, Melbourne, Australia, 2015.
- [10] R.Bacher, T.Delfs, D.Mathes, T.Tempel, T.Wilksen. – Towards a new control system for PET-RA IV. - Proceedings of the ICALEPCS'2021, Shanghai, China, 2021.

Рукопись поступила 19 февраля 2024 г.

В.П. Воеводин

Системе управления ускорительного комплекса У-70 двадцать пять лет (история и статус).

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	21.02.2024	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.	
Печ.л. 2.	Уч.– изд.л. 2,9.	Тираж 60.	Заказ 3.	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 2024-2,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2024
