

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПУЧКА БУСТЕРА NICA

*В. Андреев, В. Волков, Е. Горбачев¹, В. Елкин,
В. Исадов, А. Кириченко, Д. Монахов, Х. Назлев,
С. Романов, Т. Рукояткина, Г. Седых*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

NICA — это новый ускорительный комплекс, который в настоящее время создается в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. Комплекс NICA предназначен для проведения коллайдерных экспериментов с пучками тяжелых ионов на энергиях до 4,5 ГэВ/нуклон и поляризованных протонов с энергией до 12,6 ГэВ [1]. Он состоит из инжекционного комплекса, сверхпроводящего бустерного синхротрона (бустера), модернизированного синхротрона нуклотрон и двух колец коллайдера. В докладе описывается структура, основные возможности и текущий статус разработки системы управления бустера NICA.

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) is a new accelerator complex being constructed at the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia). NICA will provide collider experiments with heavy ions at a maximum energy up to 4.5 GeV/u and polarized protons at energy up to 12.6 GeV. It will consist of injection complex, superconducting booster synchrotron, Nuclotron and two collider rings. Structure, main features and current status of the TANGO based control system for the booster synchrotron are described.

PACS: 29.20.Lq

ВВЕДЕНИЕ

Система управления представляет собой распределенный комплекс оборудования и программного обеспечения, от которого зависит функционирование различных систем установки и их взаимодействие для обеспечения ускорения заряженных частиц в цепочке ускорителей комплекса и проведения экспериментов. Система управления (СУ) бустера является частью общей системы управления комплекса NICA и построена на общих принципах.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СУ БУСТЕРА

СУ создает необходимую инфраструктуру для надежного и безопасного выполнения программного обеспечения и обеспечения связи между различными системами, а также предоставляет некоторые программные сервисы. Инфраструктура СУ включает в себя компьютерную сеть в масштабах ускорительной установки, вычислительный

¹E-mail: egorbe@jinr.ru

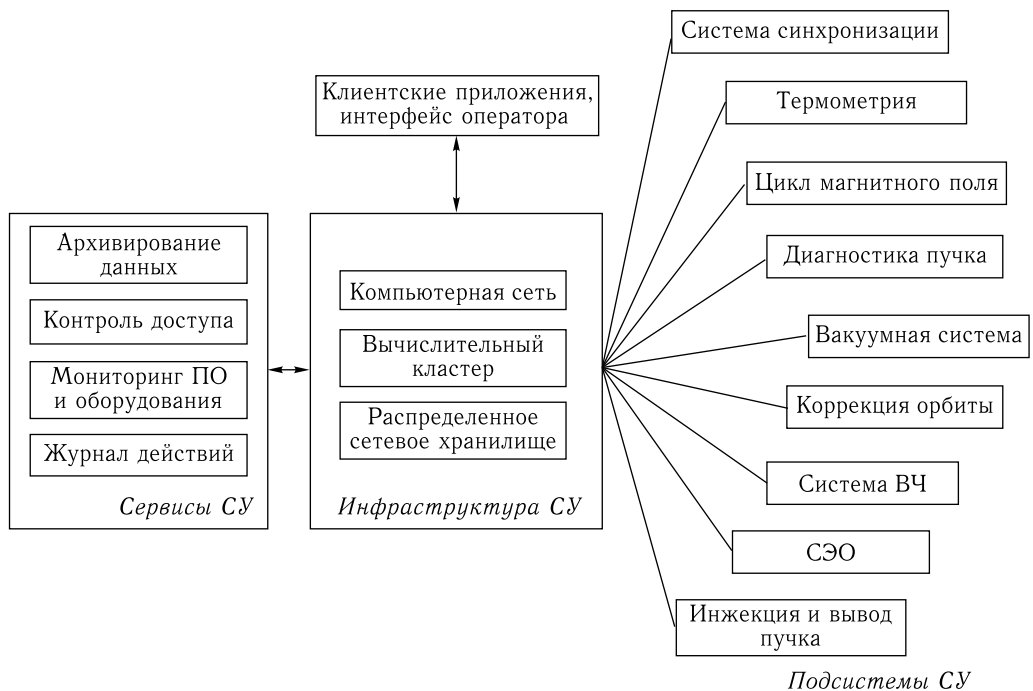
кластер и распределенную систему хранения данных. Программные сервисы предназначены для обеспечения безопасного и надежного функционирования СУ, ее администрирования, сбора, хранения данных и доступа к ним. Эти программные сервисы включают в себя системы архивации данных, авторизации и ограничения доступа, мониторинг программных и аппаратных ресурсов СУ, запись (журналирование) состояния СУ и действий операторов. Клиентское программное обеспечение предоставляет операторам средства управления системами ускорителя и визуализирует данные СУ и диагностики пучка ускорителя.

СУ включает в себя несколько независимых подсистем, необходимых для работы ускорителя, таких как системы синхронизации, термометрии, задания цикла магнитного поля, диагностики пучка, коррекции орбиты, инъекции и вывода пучка, управления ВЧ, управления вакуумом, электронного охлаждения и других. На рисунке представлена общая структурная схема СУ бустера.

По выполняемым функциям можно выделить три уровня задач СУ.

- Уровень доступа к оборудованию: промышленные компьютеры, контроллеры и крейты, на которых выполняются низкоуровневые программы, управляющие подключенным оборудованием, опрашивающие сенсоры и скрывающие от верхних уровней ПО особенности (шины, протоколы) подключения устройств.

- Сервисный уровень: высокоуровневые программы, осуществляющие централизованный сбор данных с элементов уровня доступа к оборудованию, их буферизацию и обработку, преобразования физических величин и реализацию алгоритмов управления подсистемами.



Структурная схема системы управления бустера

- Клиентский уровень: отображение состояния систем ускорителя, визуализация обработанных данных, предоставление оператору средств для управления ускорительным комплексом.

Элементы АСУ различных уровней связаны между собой при помощи транспортного протокола, работающего поверх TCP/IP. Этот протокол связи реализован при помощи объектно-ориентированной системы управления TANGO controls [2]. Взаимодействие объектов СУ между собой происходит при помощи стандартного интерфейса TANGO (команды, атрибуты, состояния), при этом оно может происходить синхронно, асинхронно или быть основанным на событиях.

ИНФРАСТРУКТУРА СУ БУСТЕРА

Разбиение компонентов АСУ на несколько уровней позволяет переместить большую часть вычислительных задач и задач обработки и хранения данных с компьютеров, непосредственно связанных с оборудованием и датчиками, и разместить их в компьютерном кластере, который обеспечивает высокую производительность, надежность и легкую расширяемость вычислительных мощностей и дискового пространства. Наиболее эффективным способом организации сервисного уровня является виртуализация. Виртуальные серверы имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с физическими:

- удобное управление: разворачивание, клонирование, резервное копирование;
- разделение задач: виртуальный сервер с необходимым гарантированным количеством ресурсов выделяется под конкретную задачу СУ;
- более эффективное использование вычислительных ресурсов (процессорное время, оперативная память, дисковое пространство) за счет тонкой настройки выделения ресурсов для каждой задачи СУ;
- реализацию решений с высокой доступностью: виртуальные серверы могут быть автоматически переброшены на другие физические серверы в случае проблем с сервером-хостом.

Для задач АСУ бустера используется кластер высокой доступности из восьми физических серверов Supermicro под управлением системы виртуализации Proxmox [3], которая является открытой серверной платформой для создания и управления виртуальной инфраструктурой, включающей в себя виртуальные машины, хранилища и виртуальные сети.

Важнейшим компонентом кластера является общее хранилище данных. Это дисковое пространство, к которому имеют доступ все компьютеры кластера и на котором хранятся образы дисков виртуальных машин и данные СУ. Ключевыми параметрами хранилища являются высокая производительность, надежность и возможность расширения доступного пространства без потери производительности. СУ бустера использует одно из самых перспективных современных решений — CEPH storage [4]. CEPH представляет собой распределенный кластер, узлы которого соединены между собой высокоскоростной сетью. Каждый из узлов кластера при этом имеет некоторое количество дисковых устройств, каждое из которых независимо участвует в хранении данных. Данные динамически распределяются и копируются между узлами кластера, обеспечивая надежность хранения при помощи избыточности, т. е. данные хранятся

в нескольких экземплярах на разных дисках разных физических серверов. Избыточность данных позволяет продолжать выполнение задач СУ в случае выхода из строя дисков и даже целых серверов.

Узлы кластера объединены при помощи быстрой дублированной сети с пропускной способностью 2×10 Гбит при помощи двух коммутаторов Cisco Nexus5k. Дублирование увеличивает пропускную способность сети и обеспечивает функционирование системы при выходе из строя одного из коммутаторов.

Физические серверы являются одновременно и узлами распределенного сетевого хранилища СЕРН, и узлами для запуска виртуальных машин СУ. Масштабируемость ресурсов СУ достигается добавлением узлов в кластер серверов.

Сетевая инфраструктура в туннеле бустера создана на основе коммутаторов Aruba 3810M, которые размещены в четырех шкафах по периметру бустера с общим количеством портов Ethernet около 400. В целях безопасности для компьютеров и оборудования СУ используются адреса IP из диапазона, который недоступен из-за пределов ОИЯИ.

ПОДСИСТЕМЫ СУ БУСТЕРА

К первому технологическому сеансу бустера были созданы несколько подсистем, которые являются наиболее приоритетными для запуска ускорителя. Общими чертами созданных подсистем является использование оборудования National Instruments [5], программных компонентов нижнего и верхнего уровня в формате TANGO controls и реализация клиентского уровня в виде мультиплатформенных веб-приложений, выполняемых в браузере [6]. Ниже описаны особенности реализаций этих систем.

Система термометрии. Основным назначением системы является измерение криогенных гелиевых и азотных температур в магнитно-криостатной системе кольца бустера и измерительного периода. Для измерения гелиевых температур применяются резистивные сенсоры типа TBO, а для измерения азотных температур — платиновые сенсоры Pt100. Система построена на основе измерительного оборудования National Instruments в формате PXI и состоит из пяти крейтов NI PXIe-1082 с модулями измерения температур NI PXI-4357 (24 бит АЦП, 20 каналов) и прецизионными источниками тока Lakeshore 121DC. Система термометрии имеет более 400 каналов измерений, которые записываются в систему архивации данных HDB+ каждые 2 с.

Система задания магнитного цикла и импульсов синхронизации. Система предназначена для управления тремя основными источниками питания, которые питают дипольные магниты и линзы бустера. Управление осуществляется при помощи нескольких серий импульсов «+» и «-», описывающих закон изменения магнитного поля в бустере в процессе ускорения, а также коэффициентов пропорциональности тока в линзах F и D относительно главного поля. Кроме того, система генерирует синхроимпульсы, связанные с характерными точками цикла ускорения, для синхронизации работы других систем ускорителя. Система базируется на модуле NI PXIe-7821 цифрового ввода-вывода (128 цифровых каналов, 512МБ DRAM) на основе ПЛИС Kintex 7 160T. Для раздачи и приема цифровых сигналов синхронизации и блокировок разработан крейт в стандарте Euro 3U с оптическими и LVTTTL модулями ввода-вывода.

Система измерения стационарной орбиты пучка бустера. Система построена на базе измерительного оборудования фирмы Instrumentation Technologies [7]. В кольце бустера в блоках линз размещены 24 позиционно-чувствительных емкостных пикап-электрода (ПЭ). ПЭ представляют собой эллиптические сигнальные электроды с диагональными зазорами. Сигналы с четырех пластин ПЭ поступают на широкополосные четырехканальные предусилители, расположенные непосредственно на кожухе ускорителя, для согласования высокого импеданса ПЭ с входным импедансом аппаратуры обработки сигналов. Далее сигнал усиливается при помощи четырехканальных широкополосных усилителей Amplifier 110 с регулируемым коэффициентом усиления в диапазоне от -55 до 60 дБ. Усиленный сигнал передается по кабелю на аппаратуру обработки сигнала Libera Hadron [8], представляющую собой крейт microTCA с 4 модулями обработки сигналов (один крейт обрабатывает сигналы 4 ПЭ), которые оцифровывают сигналы с пластин ПЭ и вычисляют положение центра тяжести пучка. Для измерения стационарной орбиты используются 24 предусилителя, 24 усилителя Amplifier 110 и 8 крейтов Libera Hadron, установленных в 4 шкафа по периметру бустера.

Система коррекции орбиты пучка бустера. Система предназначена для коррекции искажений равновесной орбиты пучка в бустере. Основные источники погрешностей орбиты:

- поворот медианной плоскости дипольных магнитов вокруг продольной оси;
- поперечные смещения магнитных осей квадрупольных линз;
- разброс эффективных длин дипольных магнитов;
- магнитные элементы системы вывода;
- статические рассеянные поля вблизи прямолинейных промежутков ускорителя.

Система состоит из 24 дипольных и 12 мультипольных корректирующих обмоток, установленных в бустере. Корректоры запитаны при помощи 72 источников питания фирмы EVPU [9] PS 140-8, которые управляются аппаратурой на основе модулей аналогового и цифрового ввода-вывода National Instruments в формате PXI. Состав оборудования системы коррекции орбиты: 20 шкафов с источниками питания EVPU PS 140-8, 4 управляющих крейта NI PXIe-1082 с модулями 16-битных генераторов функций NI PXIe-6733, модулями аналогового ввода NI PXI-6280 и модулями интерфейса RS485 NI PXI 8433/4.

Система управления инжекцией пучка в бустер. Система инжекции в бустер состоит из трех пар инфлекторных пластин и электростатического септума. Для реализации различных схем инжекции в бустер (однократная, многократная, многооборотная) используется импульсная зарядка пяти инфлекторных пластин через высоковольтные повышающие трансформаторы и их быстрая разрядка при помощи пяти мощных тиристорных источников питания. Система управления формирует управляющие импульсы зарядки и разрядки пластин, синхронизирует их с внешним сигналом начала инжекции, управляет источниками напряжения Sorensen DCS 300-3,5 для установки амплитуды зарядки и блоками управления тиратронов через шину CAN, обеспечивает измерения рабочих параметров системы и реализует систему блокировок.

Система управления инжекцией реализована на промышленном шасси NI CompactRIO с RIO-9048 с ПЛИС Xilinx Kintex-7 160T и наборе модулей в формате CompactRIO для медленного и быстрого аналогового и цифрового ввода-вывода.

Интеграция сторонних систем управления. Часть подсистем бустера, таких как система питания ВЧ, вакуумная система, система электронного охлаждения, система блокировок, была изготовлена сторонними организациями. Для интеграции их систем управления в СУ бустера были разработаны программные модули TANGO для обмена данными с помощью следующих протоколов: OPC server, NI DataSocket, Modbus, Profibus, CAN, TCP sockets. С помощью промежуточных устройств TANGO верхнего уровня, реализующих необходимый интерфейс взаимодействия, и устройств TANGO обмена данными через различные протоколы связи реализуется взаимодействие СУ бустера с любыми сторонними системами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система управления бустера, основанная на TANGO Controls, разработана в ЛФВЭ ОИЯИ. В рамках СУ бустера созданы и испытаны несколько подсистем, необходимых для запуска бустера, таких как система термометрии, задания магнитного цикла, диагностики пучка, коррекции орбиты и управления инжекцией в бустер. Разработаны методы интеграции сторонних систем управления в СУ бустера. Создана инфраструктура для выполнения задач СУ, включающая в себя компьютерный кластер, компьютерную сеть, распределенное сетевое хранилище, средства администрирования, журналирования и мониторинга СУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G., Agapov N., Brovko O. et al.* NICA Project at JINR // Proc. of IPAC2013, Shanghai, China, May 2013.
2. TANGO controls. <https://www.tango-controls.org>.
3. Proxmox. <https://www.proxmox.com/en>.
4. CEPH. <https://ceph.io>.
5. National Instruments. <http://www.ni.com>.
6. *Sedykh G. S., Gorbachev E. V., Elkin V. G.* Tango Web Access Modules and Web Clients for NICA Control System // Proc. of ICALEPCS-2017, Barcelona, Spain, 2017. P. 806–808.
7. Instrumentation Technologies. <https://www.i-tech.si>.
8. Аппаратура Libera Hadron. <https://www.i-tech.si/products/libera-hadron>.
9. EVPU. <https://www.evpu.sk/en>.