

Научная статья

УДК 681.518.3, 681.5.08, 681.518.5

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-23-33

Аппаратура и программное обеспечение системы управления каналом «бустер – нуклотрон» комплекса НИКА*

**Никита Сергеевич Щегольков, Антон Владимирович Павленко
Андрей Николаевич Журавлев, Андрей Александрович Крылов
Александр Александрович Морсин, Дмитрий Валентинович Сеньков
Александр Алексеевич Жариков**

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

N.S.Schegolkov@inp.nsk.su

Аннотация

В ИЯФ СО РАН была разработана, изготовлена и запущена в ОИЯИ система перевода пучка из бустера в нуклотрон комплекса НИКА. В статье рассматривается аппаратура подсистем контроля и управления, а также описываются принципы и состав комплекта программного обеспечения на основе платформы Tango, предназначенного для выполнения инженерных манипуляций с отдельными элементами и пригодного для работы во время ускорительных сеансов.

Ключевые слова:

система управления, электрофизическая установка, автоматизация, Tango

Для цитирования

Щегольков Н. С., Павленко А. В., Журавлев А. Н., Крылов А. А., Морсин А. А., Сеньков Д. В., Жариков А. А. Аппаратура и программное обеспечение системы управления каналом «бустер – нуклотрон» комплекса НИКА // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 23–33. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-23-33

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Hardware and Software of the Booster Nuclotron Channel Control System of the NIKA Complex

Nikita S. Shchegolkov, Anton V. Pavlenko, Andrey N. Zhuravlev,
Andrey A. Krylov, Alexander A. Morsin, Dmitry V. Senkov,
Alexander A. Zharikov

Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation
N.S.Schegolkov@inp.nsk.su

Abstract

At the BINP, the development, production and launch at JINR of a system for transferring a beam from the Booster to the Nuclotron of the NIKA complex was completed. The article discusses the equipment of monitoring and control subsystems, as well as describes the principles and composition of a software package based on the TANGO platform, designed to perform engineering manipulations with individual elements and suitable for work during acceleration sessions.

Keywords:

control system, electrophysical installation, automation, Tango

For citation

Shchegolkov N. S., Pavlenko A. V., Zhuravlev A. N., Krylov A. A., Morsin A. A., Senkov D. V., Zharikov A. A. Hardware and software of the Booster Nuclotron channel control system of the NIKA complex. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 23–33 (in Russ). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-23-33

Введение

Система перевода пучка из бустера в нуклотрон включает в себя вывод пучка из бустера и канал перепуска частиц из бустера в нуклотрон. В состав последнего входит станция обдирки ионов до необходимого зарядового состояния и канал вывода ионов с нецелевым зарядовым состоянием [1]. Структура канала показаны на рис. 1. Элементами канала являются: BC1–BC5 – дипольные магниты; QC1–QC8 – квадрупольные линзы; SEPT_1,2 – септум-магнит для вывода пучка из бустера; SEPT_3 – септум-магнит для вывода пучка ионов с нецелевым зарядовым состоянием; FOIL – станция обдирки; Absorber – поглотитель ионов с нецелевым зарядовым состоянием; CORR1-3 – отдельно стоящие корректоры; BPM_PUMP – датчики положения пучка (вакуумные насосы); BPM – отдельно стоящие датчики положения пучка; PUMP – отдельно стоящие насосы. Транспортировка частиц происходит по сложной траектории между ускорительными кольцами, находящимися на разных уровнях по высоте. Магнитные элементы канала работают в импульсном режиме. Период работы составляет 4 с и соответствует циклу бустера. Длительность инжектируемого пучка не более 1 мкс.

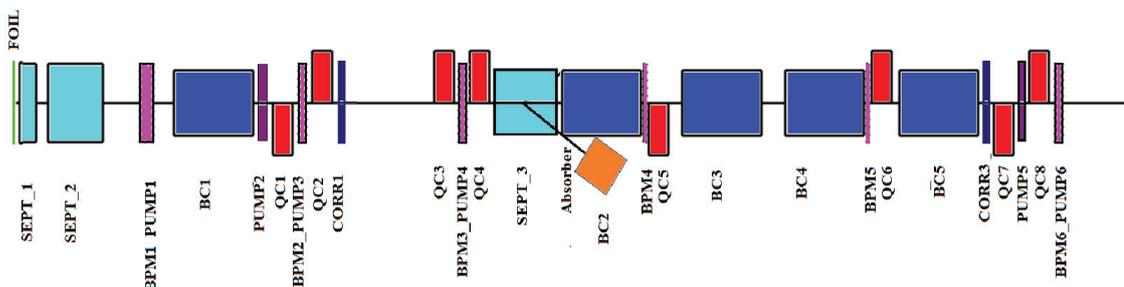


Рис. 1. Структура канала и его топология
Fig. 1. Channel structure and topology

Общее описание системы управления

Структура системы управления представлена на рис. 2.

Система включает элементы управления источниками питания, аппаратуру синхронизации и контроля параметров импульсных сигналов, а также диагностику пучка. Контроль вакуума, блокировки и другие технологические подсистемы интегрированы в уже существующие на комплексе. Аппаратура системы синхронизации и измерительная электроника выполнена в формате VME и располагается в соответствующем крейте. Контроллер крейта подключается к локальной сети комплекса. Контроллеры источников питания встроены в источники, а оборудования для диагностики пучка представляют собой отдельно стоящие модули, также подключаемые через Ethernet.

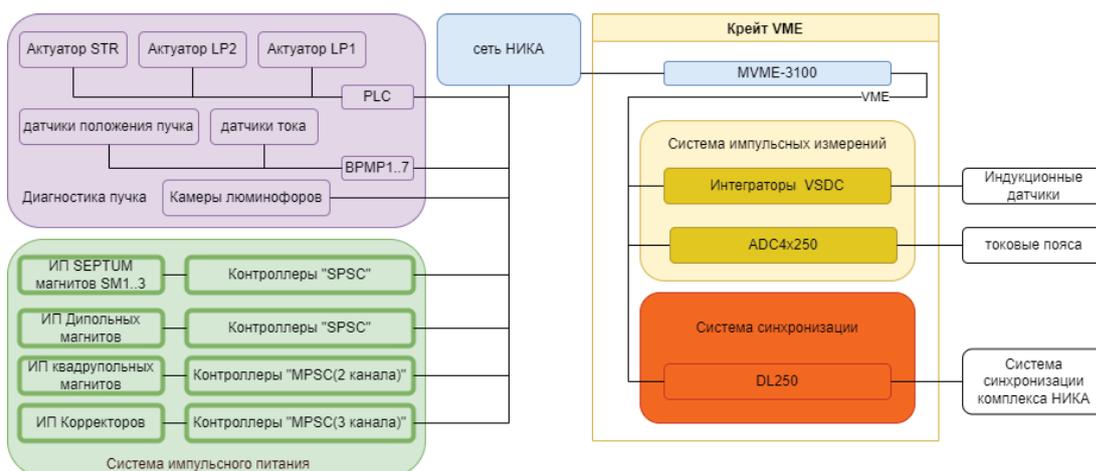


Рис. 2. Структура системы управления каналом

Fig. 2. Channel control system structure

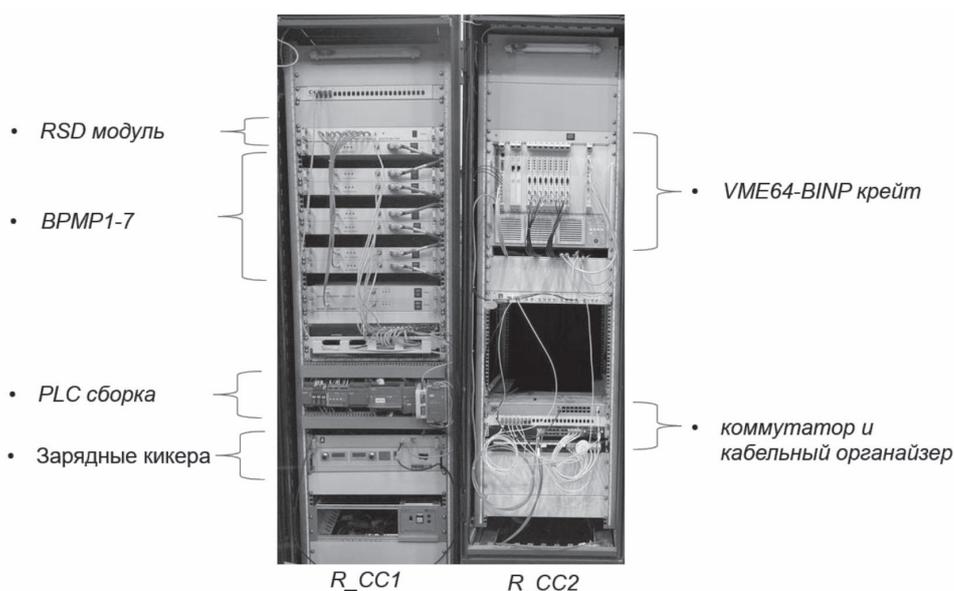


Рис. 3. Фотография шкафов R_CC1 и R_CC2

Fig. 3. Photo of cabinets R_CC1 and R_CC2

Значительная часть аппаратуры системы управления каналом сконцентрирована в двух шкафах, обозначенных как R_CC1 и R_CC2, их фотография представлена на рис. 3. В шкафу R_CC1 располагаются 7 модулей ВРМР1-7 и два модуля DQ1-2, которые обрабатывают сигналы с датчиков положения и тока пучка. Блок RSD в свою очередь занимается распределением сигналов синхронизации для блоков ВРМР и DQ. Сигналы от люминофорных станций и станции обдирки подключаются к комплекту оборудования на основе программируемого логического контроллера, обозначенного как PLC-сборка. Еще ниже располагается зарядное устройство генератора ударных магнитов и контроллер для него. В самом низу – контроллер шагового двигателя станции обдирки. В шкаф R_CC2 установлено коммутационное оборудование сети Ethernet и глобальной системы синхронизации комплекса, а также крейт VME64-BINP, содержащий электронику для систем мониторинга импульсных сигналов и синхронизации канала.

Управление системой импульсного питания

Система питания дипольных, квадрупольных, корректирующих и септум-магнитов включает 22 импульсных источников, для управления которыми используются контроллеры двух типов: одноканальным SPSC и многоканальным MPSC. В таблице представлен список типов импульсных магнитов транспортного канала, их основные параметры, включая длительность импульса, и указаны типы используемых контроллеров. Контроллеры SPSC работают совместно с источниками питания дипольных и септум-магнитов. Контроллер MPSC является четырехканальным устройством, однако в источниках питания квадрупольных линз задействованы два, а в источниках питания корректоров – три канала этого контроллера.

Классификация магнитных элементов по их типам и типы контроллеров источников питания

Classification of magnetic elements by their types and types of power supply controllers

Условное обозначение	Номинальное поле, Т	Время нарастания до максимума, мс	Тип контроллера	Колчество
SEPT_1	0,5	0,04	Одноканальный SPSC	1
SEPT_2, SEPT_3	1,35	0,6	Одноканальный SPSC	2
BC1–BC5	1,6	10,5	Одноканальный SPSC	5
CORR1–CORR3		15	Трехканальный MPSC	2
	Градиент, Т/м			
QC1–QC4	до 7,4	7,3	Двухканальный MPSC	2
QC5–QC8	до 13	7,3	Двухканальный MPSC	2

С точки зрения управления контроллеры схожи, взаимодействие с ними осуществляется удаленно по протоколу Modbus/TCP. С помощью регистров контроллера устанавливается уровень заряда конденсаторных накопителей, задаются значения иных внутренних параметров, считываются данные об измеренном напряжении батарей, данные о состоянии блокировок, а также осциллограммы выходных тока и напряжения для сгенерированного импульса. Оба типа контроллеров получают сигналы от системы синхронизации.

Структура питания ударного магнитов выпуска из бустера изображена на рис. 4.

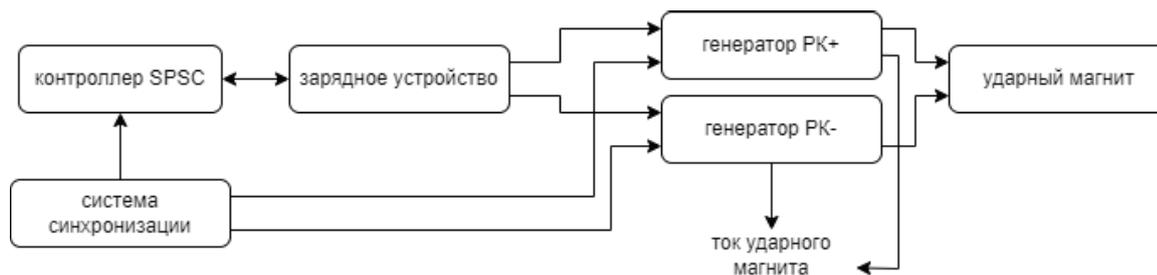


Рис. 4. Структурная схема системы питания выпускного ударного магнита
 Fig. 4. Block diagram of the power supply system for the exhaust impact magnet

Поле в выпускном ударном магните [2] формируется с помощью двух импульсных генераторов, расположенных в газонаполненных баках. Каждый импульсный генератор содержит накопитель энергии на основе формирующей линии и коммутатор. Зарядное устройство этих генераторов марки Spellman SL60PN1200 установлено в шкаф R_CC1, а блок его управления сделан на основе контроллера SPSC, имеющего модифицированную карту регистров. Выходы генераторов оснащены поясами Роговского, сигнал с которых нормируется с помощью согласованных делителей и передается коаксиальными кабелями на вход осциллографического модуля в шкаф R_CC2.

Контроль параметров импульсных элементов

Поворотные импульсные магниты и квадрупольные линзы оснащены встроенными индукционными датчиками, представляющими собой катушку, выполненную на многослойной печатной плате, снабженную электростатическим экраном на внешних слоях. Система обеспечивает установку требуемой величины поля при настройке режима транспортировки частиц, а также контроль стабильности поля, для чего содержит 16 измерительных каналов. Измерение импульсного магнитного поля основано на интегрировании сигнала индукционных датчиков при помощи цифровых интеграторов VsDC3. Принцип действия VsDC3 описан в [3], а пример использования для реализации импульсных измерений представлен в [4]. Каждый магнит имеет основной и запасной индукционный датчик. Цифровые интеграторы VsDC3 обладают разрешающей способностью лучше, чем 10^{-4} . Для их функционирования требуется подать на каждый канал синхроимпульсы: старта и остановки интегрирования. Старт интегрирования производится незадолго до срабатывания импульсного источника, а остановка должна быть привязана к моменту пролета пучка.

Выходной ток генераторов, питающих ударный магнит, контролируется с помощью поясов Роговского, оцифровываемых осциллографическим модулем ADC4X250-4CH, который расположен в крейте VME64-BINP. Этот модуль содержит четыре канала с частотой дискретизации 250 Мвыб/с по каждому из каналов, разрядностью 12 бит и полосой сигнального тракта около 80 МГц. Подробнее модуль ADC4X250-4CH описан в [5]. Осциллограммы тока используются для настройки времени срабатывания пары генераторов относительно друг друга, а также для контроля амплитуды и стабильности тока на выходе генераторов.

Оборудование для диагностика пучка

Системы диагностики пучка в канале транспортировки содержат два широкополосных датчика тока (DQ1, DQ2), семь электростатических четырехэлектродных датчиков положения пучка (BPM1 – BPM7) и три люминофорные станции. Схема обработки сигналов от датчиков

тока и датчиков положения пучка представлена на рис. 5. Она включает в себя располагаемые рядом с датчиками предусилители, а также находящиеся в радиостойках блоки электроники.

Предусилитель сигналов от датчиков положения пучка оснащен входом калибровки, сигнал которой формируется блоком ВРМР. Измеритель тока пучка обладает погрешностью менее 3 % при максимально допустимом импульсном токе 400 мА. Погрешность определения положения пучка не превышает 0,2 мм в области 50 % от апертуры датчиков.

Для функционирования блоков обработки сигналов требуется один сигнал старта, подаваемый незадолго до пролета пучка. Взаимодействие с системой управления осуществляется через Ethernet посредством UDP-серверов, работающих в каждом блоке ВРМ и DQ и имеющих специализированную систему команд.

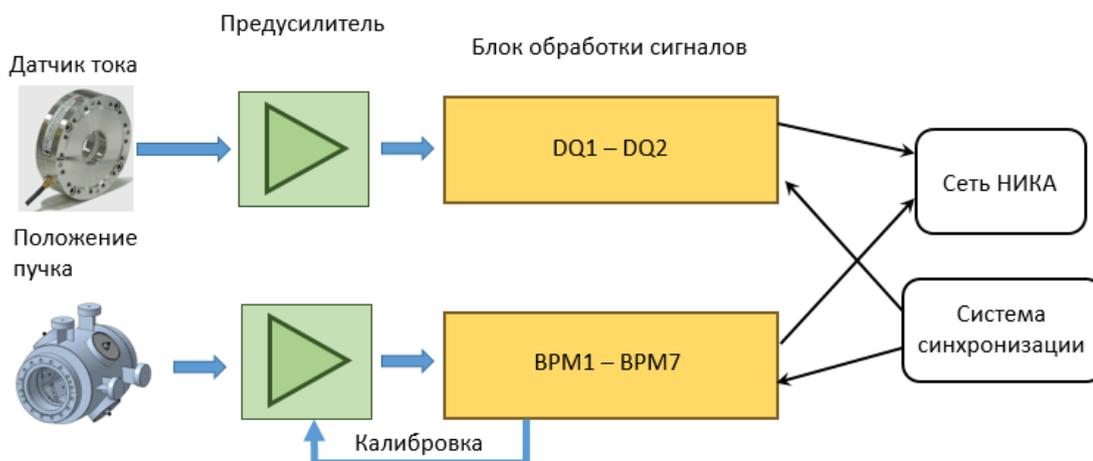


Рис. 5. Схема обработки сигналов тока и положения пучка
Fig. 5. Scheme for processing signals of current and beam position

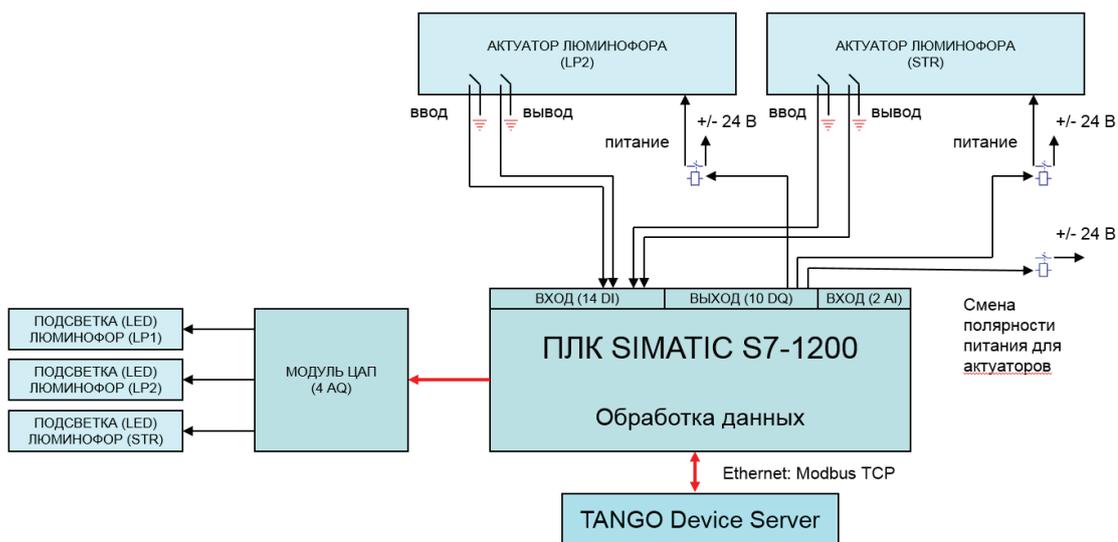


Рис. 6. Структурная схема PLC-сборки для управления люминофорными станциями
Fig. 6. Block diagram of a PLC assembly for controlling phosphor stations

Рассмотрим организацию работы с люминофорными станциями (LP1, LP2 и STR). Для управления двумя из них используется сборка на основе программируемых логических контроллеров (PLC) фирмы Siemens. Структура этой сборки представлена на рис. 6. Ввод и вывод люминофорных датчиков LP2 и STR осуществляется подачей питающего напряжения на актуаторы в прямой или обратной полярности. Граничные положения люминофора определяются с помощью концевых датчиков. Питание актуаторов, сигналы от датчиков концевых положений и подсветка люминофорных экранов подключаются к модулям в сборке PLC. Взаимодействие с системой управления осуществляется через Ethernet по протоколу Modbus/TCP. Изображение пучка регистрируется с помощью ПЗС-камеры, оснащенной входом синхронизации и стандартным интерфейсом сетевого доступа GigE Vision.

Структура системы синхронизации

Система синхронизации канала транспортировки частиц организует полный набор синхросигналов для всего оборудования канала, привязанных к рабочему циклу бустера и предусматривает возможность автономной работы канала для нужд пусконаладочных или профилактических работ. Структура системы синхронизации показана на рис. 7 и содержит следующие элементы.

1. Модуль ввода сигналов синхронизации.
2. VME крейт со специализированной магистралью в формате VME64 BINP.
3. Пара цифровых линий задержки DL250VME и формирователей сигналов DL250RIO.

Импульсы от глобальной системы синхронизации поступают на вход блока ввода сигналов синхронизации, расположенного в позиции 2 крейта, выполненного в формате VME64 – BINP. Крейт VME64 – BINP обладает возможностями для организации межмодульной синхронизации [6].

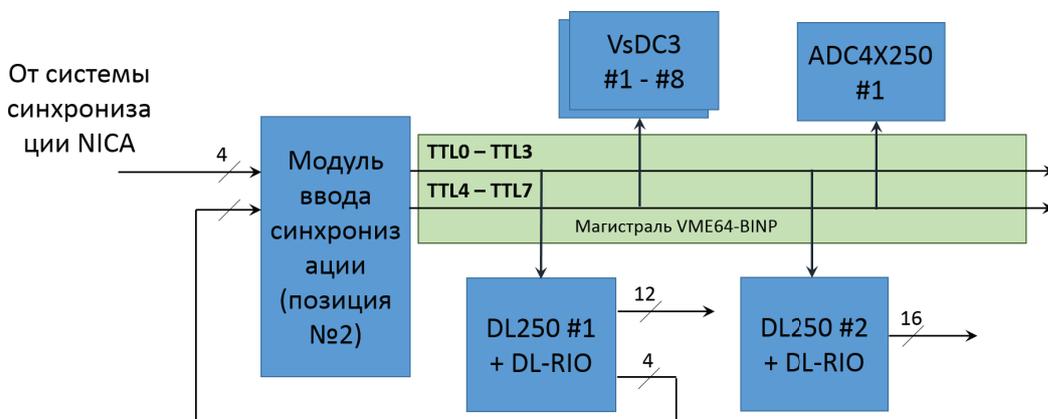


Рис. 7. Организация системы синхронизации элементов канала
Fig. 7. Organization of a synchronization system for channel elements

На рис. 8 представлена временная диаграмма срабатывания элементов канала. От глобальной системы синхронизации комплекса поступает три сигнала: два предварительных запуска за 20 и 1 мс до пролета пучка и сигнал на старт перепуска. Эти сигналы запускают отдельные каналы двух цифровых линий задержки DL250VME, которые через формирователи сигналов DL250-RIO генерируют 21 задержанный импульс для синхронизации срабатывания источников питания и оборудования диагностики пучка с пролетом пучка. Функционирование и возможности модулей DL250VME и DL250-RIO представлены в [6].

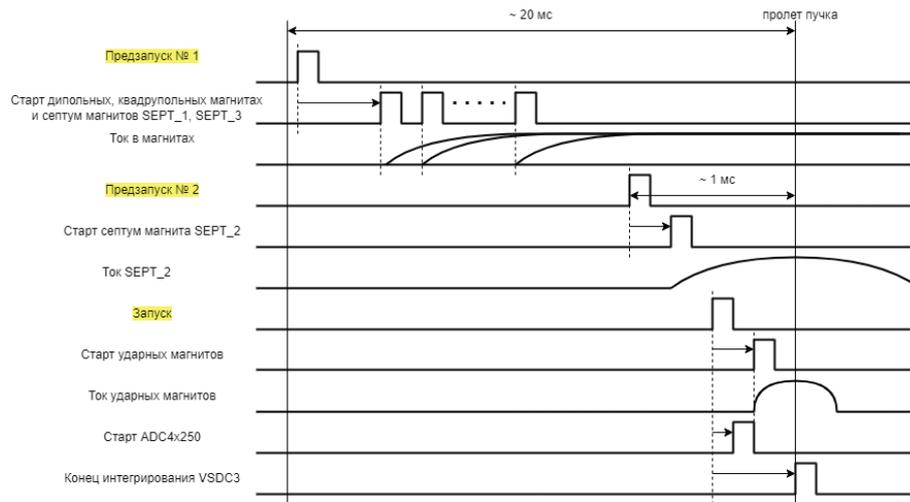


Рис. 8. Временная диаграмма работы канала
 Fig. 8. Time diagram of channel operation

Четыре выхода одного из DL250VME подключены обратно на входы модуля ввода синхросигналов, создавая на магистрали крейта дополнительные сигналы с регулируемой задержкой. Таким образом, организован старт и остановка цифровых интеграторов VsDC3, старт осциллографического модуля ADC4X250-4CH, а также реализована возможность автономной синхронизации канала транспортировки.

Программное обеспечение Аппаратно-серверная инфраструктура

Система управления комплексом НИКА построена на основе программного каркаса Tango, что определило базу разрабатываемого программного обеспечения для канала перепуска. Платформа Tango реализует концепцию клиент-серверного взаимодействия. Серверную часть программного комплекса реализует доступ к оборудованию, она разделена на несколько уровней:

- 1) нижний уровень шины;
- 2) логический уровень устройства;
- 3) серверный уровень взаимодействия с Tango.

Взаимосвязь между уровнями демонстрируется на рис. 9.

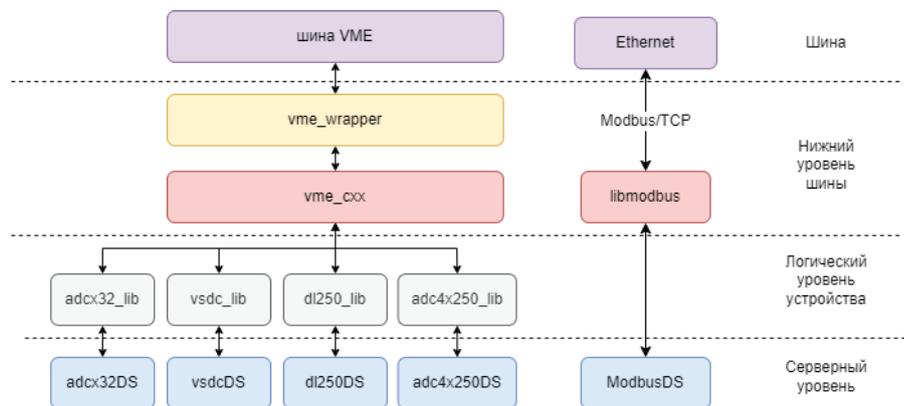


Рис. 9. Схема архитектуры программного обеспечения серверного уровня
 Fig. 9. Server-level software architecture diagram

Управление, настройка и чтение данных из модулей осуществляется через конфигурационные регистры и память, доступ к которым открыт по шине VME или протоколу Modbus/TCP. Для работы с ними сделан первый уровень программного обеспечения, включающий набор библиотек для шины VME и реализации протокола Modbus/TCP. Работа с шиной VME разбита на два модуля: библиотеку `vme_wrapper` на языке C для непосредственного взаимодействия с драйвером шины и `vme_sxx` как интерфейс на языке C++. Работа протокола Modbus реализована через открытую библиотеку `libmodbus`.

Второй уровень включает библиотеки, реализующие бизнес-логику, а именно: сбор и предварительную обработку данных и переключение между логическими режимами работы устройств. Для устройств на шине VME этот уровень включает 4 библиотеки, каждая из которых соответствует определенному устройству. Для модулей Modbus/TCP данный уровень не используется.

Третий уровень представлен серверами Tango, которые подключают устройства к общей системе управления, предоставляя управления удаленному пользователю.

Сервер Modbus-Tango

В число устройств, управляемых по протоколу Modbus/TCP, входят два типа контролеров источников питания (SPSC и MPSC) и PLC сборка. Четырехканальные контроллеры MPSC используются в двух вариациях: как двухканальный для источников питания квадрупольных линз и трехканальный для источников питания корректоров. Для обеспечения управления таким набором устройств был разработан гибкий Tango-сервер для всех Modbus-устройств. Стандарт Modbus строго определен, это позволило реализовать конфигурируемый Tango-сервер, атрибуты которого динамически генерируются в процессе инициализации сервера. Конфигурация, описывающая карту регистров устройства, представлена в качестве свойства девайс-сервера в базе данных Tango. Для работы и с контроллерами импульсных источников питания реализована поддержка битов готовности. После запуска источника питания, как только контроллер выполнит измерение осциллографических данных, бит готовности переходит в состояние логической единицы. Опрашивая этот бит, сервер обнаруживает готовность нового измерения, выполняет сброс бита готовности и чтение осциллографических данных.

Клиентские приложения

Инженерные клиентские приложения с графическим интерфейсом создаются в первую очередь для разработчиков с целью проверки работоспособности устройств, а также систем на их основе. Это подразумевает необходимость предоставления через клиентские приложения доступа абсолютно ко всем имеющимся в устройствах настройкам и данным. Для того чтобы разработанные инженерные приложения оказались пригодны для работы с каналом во время сеансов работы с пучком, учитывая количество отображаемых атрибутов, было решено применить табличное представление. На рис. 10 представлено приложение для работы с контроллерами источников питания поворотных и септум-магнитов. Каждая строка таблицы относится к отдельному устройству, столбец отвечает за атрибут какого-либо типа. Атрибуты разбиты на подгруппы и скомпонованы в отдельных вкладках таблицы. На центральной вкладке находятся наиболее востребованные с точки зрения оператора атрибуты, а именно: состояние источника, флаги разрешения работы, задание напряжения накопителей. Таблицы поддерживают множественное редактирование через выделение нескольких ячеек и занесение всем ячейкам необходимого значения за одно действие.

Клиентские приложения используют унифицировать кодовую базу и конфигурационные файлы, в которых хранятся настройки, включающие соответствие между Tango-атрибутом и способом его отображения.

The screenshot shows a window titled 'septum' with a 'choose devices' dropdown. Below it are tabs for 'Parameters', 'Graph', and 'Integral Graph'. The 'Parameters' tab is active, displaying a table with columns: Control, Status, Interlocks, Advanced, State, PowerON, EnableCharging, Vset, запуск, ClearInterlocks, and ClearStartedFlag. The table lists nine devices, all with 'ON' status and '0.00' Vset values.

Control	Status	Interlocks	Advanced	State	PowerON	EnableCharging	Vset	запуск	ClearInterlocks	ClearStartedFlag
bnc/ps/bm1	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/bm2	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/bm3	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/bm4	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/bm5	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/sm1	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/sm2	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bnc/ps/sm3	ON			ON	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Рис. 10. Пример табличного инженерного приложения
 Fig. 10. Example of a spreadsheet engineering application

Заключение

Для системы перевода пучка «бустер – нуклотрон» были разработаны, изготовлены и введены в эксплуатацию аппаратура и программное обеспечение, обеспечившие успешный запуск и последующую работу канала. Были реализованы подсистемы внутренней синхронизации элементов канала, системы диагностики и управления пучка. В ходе работы оптимизированы методы разработки программного обеспечения, что значительно улучшило и упростило программный комплекс управления.

Список литературы

1. **Tuzikov A., et al.** Beam transfer systems of NICA facility: from HILAC to Booster // *Proceedings of RuPAC 2021*, 2021.
2. **Анчугов О. В. и др.** Ударный магнит для вывода пучка из бустера в канал «бустер – нуклотрон» комплекса NICA // *Приборы и техника эксперимента*. 2022. № 3. С. 100–107.
3. **Batnikov A. M., Pavlenko A. V.** Precise digital integration in wide time range: theory and realization // *JINST*. 2017. Vol. 12. P. P07012.
4. **Batnikov A., Ilyin I., Pavlenko A.** Electronics for precise measurements of accelerator pulsed magnets // *Proceedings of IPAC2013*. Shanghai China, 2013. P. 3216.
5. **Kotov E. S., et al.** VME-based digitizers for waveform monitoring system of linear induction accelerator LIA 20 // *Proceedings of ICALEPCS2017*. Barcelona, Spain, 2017. P. 1291–1293.
6. **Fatkin G., et al.** New VME-based hardware for automation in BINP // *Proceedings of ICALEPCS2017*. Barcelona, Spain, 2017. P. 1294–1297.

References

1. **Tuzikov A., et al.** Beam transfer systems of NICA facility: from HILAC to Booster. *Proceedings of RuPAC 2021*, 2021.
2. **Anchugov O. V., et al.** Impact magnet for extracting a beam from a booster into the booster–nuclotron channel of the NICA complex. *Instruments and experimental technique*, 2022, № 3, pp. 100–107. (in Russ.)
3. **Batnikov A. M., Pavlenko A. V.** Precise digital integration in wide time range: theory and realization. *JINST*, 2017, vol. 12, pp. P07012.

4. **Batrakov A., Iyin I., Pavlenko A.** Electronics for precise measurements of accelerator pulsed magnets. *Proceedings of IPAC2013*. Shanghai China, 2013, p. 3216.
5. **Kotov E. S., et al.** VME-based digitizers for waveform monitoring system of linear induction accelerator LIA 20. *Proceedings of ICALEPCS2017*. Barcelona, Spain, 2017, pp. 1291–1293.
6. **Fatkin G., et al.** New VME-based hardware for automation in BINP. *Proceedings of ICALEPCS2017*. Barcelona, Spain, 2017, pp. 1294–1297.

Сведения об авторах

Щегольков Никита Сергеевич, инженер-исследователь
Павленко Антон Владимирович, кандидат технических наук
Журавлев Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук
Крылов Андрей Александрович, научный сотрудник
Морсин Александр Александрович, младший научный сотрудник
Сеньков Дмитрий Валентинович, кандидат технических наук
Жариков Александр Алексеевич, ведущий инженер-электроник

Information about the Authors

Nikita S. Shchegolkov, Research Engineer
Anton V. Pavlenko, Ph.D.
Andrey N. Zhuravlev, Ph.D.
Andrey A. Krylov, Researcher
Alexander A. Morsin, Junior Researcher
Dmitry V. Senkov, Ph.D.
Alexander A. Zharikov, Lead Electronics Engineer

*Статья поступила в редакцию 07.11.2023;
одобрена после рецензирования 01.12.2023; принята к публикации 24.01.2024*
*The article was submitted 07.11.2023;
approved after reviewing 01.12.2023; accepted for publication 24.01.2024*